



ARIEL FELIPE FERREIRA MARQUES

**SIRCo - UMA ARQUITETURA PARA
SENSORIAMENTO INTELIGENTE DE
RÁDIOS COGNITIVOS**

LAVRAS - MG

2016

ARIEL FELIPE FERREIRA MARQUES

**SIRCo - UMA ARQUITETURA PARA SENSORIAMENTO
INTELIGENTE DE RÁDIOS COGNITIVOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, área de concentração em Redes de Computadores e Sistemas Embarcados, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Prof. Dr. Luiz Henrique A. Correia

LAVRAS - MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Marques, Ariel Felipe Ferreira.

SIRCo - Uma Arquitetura para Sensoriamento Inteligente de
Rádios Cognitivos / Ariel Felipe Ferreira Marques. – Lavras :
UFLA, 2016.

151 p.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientador(a): Luiz Henrique Andrade Correia.

Bibliografia.

1. Rádio cognitivo. 2. Sensoriamento do espectro. 3. Modelo de
decisão do espectro. 4. Rede neural artificial. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.

ARIEL FELIPE FERREIRA MARQUES

**SIRCo - UMA ARQUITETURA PARA SENSORIAMENTO
INTELIGENTE DE RÁDIOS COGNITIVOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, área de concentração em Redes de Computadores e Sistemas Embarcados, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 15 de abril de 2016.

Prof. Dr. Luiz Henrique A. Correia UFLA

Prof. Dr. Daniel Fernandes Macedo UFMG

Prof. Dr. Wilian Soares Lacerda UFLA

Prof. Dr. Luiz Henrique A. Correia

Orientador

LAVRAS - MG

2016

*Dedico este trabalho aos meus pais que
sempre me apoiaram*

AGRADECIMENTOS

Primeira agradeço aos meus pais, Raul e Fátima, por me dar o suporte necessário para completar essa etapa tão importante na minha vida.

Agradeço também ao meu orientador Luiz Henrique, pelos seus valiosos conselhos, pelo companheirismo e pela amizade nesse período.

Quero deixar registrado a grande ajuda do meu colega Gilson, sem nossas conversas e os litros e litros de café, talvez eu não teria conseguido.

Agradeço a participação ativa do meu nobre colega Libério. Foram horas e horas de implementação. Também agradeço todo o pessoal do laboratório GRUBI-COM que participaram direta, ou indiretamente deste trabalho. Agradeço ao pessoal da UFMG pelos seus inestimáveis conselhos.

Por fim, quero agradecer a minha namorada Ítala, que me apoiou nos momentos difíceis, que teve compreensão quando o mestrado exigiu muito do meu tempo, que sempre tinha palavras de carinho e, como não agradecer o nobre ato, de ceder as suas tardes de domingo, para me ajudar na execução dos intermináveis experimentos.

RESUMO

A grande demanda pela utilização do espectro de frequência livre *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) tem causado problemas de interferência e falta de disponibilidade de recursos para redes sem fio. Os rádios cognitivos (RC) surgiram como alternativa para reduzir interferências e para o aproveitamento inteligente do espectro. Diversos protocolos surgiram com a finalidade de reduzir esses problemas, mas a maioria não foi implementada em dispositivos reais. Este trabalho apresenta a arquitetura Sensoriamento Inteligente para Rádios Cognitivos (SIRCo) e um modelo de decisão do espectro (MDE) baseado em uma Rede Neural Artificial (RNA) que utiliza como entrada uma base de dados com o comportamento do espectro local e uma base de dados com informações referentes aos usuários primários. Para efeito comparativo, foi implementado um modelo de decisão do espectro baseado em AHP, que emprega técnicas de multicritérios em seu método de decisão do espectro. Bem como, foi implementado também um modelo de decisão do espectro que considera somente um parâmetro físico para a classificação do canal. Os modelos de decisão avaliados, assim como a arquitetura SIRCo foram desenvolvidos no *framework* GNU-Radio e implementados em nós reais. Na avaliação dos MDEs, foram consideradas as métricas: taxa de entrega, latência (*Round Trip Time* - RTT) e *handoff*. Experimentos em nós reais mostraram que a arquitetura SIRCo com MDE baseado em RNA possibilitou o aumento da taxa de entrega de pacotes e menor variação de frequência escolhidas (*handoff*) mantendo-se a latência. Considerado a garantia de maior largura de banda como requisito de aplicação, o MDE-RNA obteve os melhores resultados quando comparado com outros MDE para redes de rádios cognitivos (RRC).

Palavras-chave: Rádio Cognitivo. Sensoriamento do espectro. Modelo de decisão do espectro. Rede Neural Artificial.

ABSTRACT

The increased demand for using the Industrial, Scientific and Medical (ISM) unlicensed frequency spectrum has caused interference problems and lack of resource availability for wireless networks. Cognitive radio (CR) have emerged as an alternative to reduce interference and intelligently use the spectrum. Several protocols were proposed aiming to mitigate these problems, but most have not been implemented in real devices. This work presents an architecture for Intelligent Sensing for Cognitive Radios (IS-CRa), and a spectrum decision model (SDM) based on Artificial Neural Networks (ANN), which uses as input a database with local spectrum behavior and a database with primary users information. For comparison, a spectrum decision model based on AHP, which employs advanced techniques in its spectrum decision method was implemented. Another spectrum decision model that considers only a physical parameter for channel classification was also implemented. Spectrum decision models evaluated, as well as ISCRa's architecture were developed in GNU-Radio framework and implemented on real nodes. Evaluation of SDMs considered metrics of: delivery rate, latency (Round Trip Time - RTT) and handoff. Experiments on real nodes showed that ISCRa architecture with ANN based SDM increased packet delivery rate and presented fewer frequency variation (handoff) while maintaining latency. Considering higher bandwidth as application's Quality of Service requirement, ANN-SDM obtained the best results when compared to other SDM for cognitive radio networks (CRN).

Keywords: Cognitive Radio. Spectrum Management. Artificial Neural Network. Spectrum decision model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Rede heterogêneas - Cenário com interferência.	19
Figura 2	Arquitetura de uma rede cognitiva.	23
Figura 3	Protocolo CPCRA.....	36
Figura 4	Modelo não-linear de um neurônio.....	40
Figura 5	Rede alimentada adiante ou acíclica com uma única camada de neurônios.....	44
Figura 6	Rede alimentada adiante ou acíclica totalmente conectada com uma camada oculta e uma camada de saída.....	46
Figura 7	Rede recorrente sem laços de auto-realimentação e sem neurônios ocultos.	46
Figura 8	Rede recorrente com neurônios ocultos.....	47
Figura 9	Divisão dos protocolos para MAC cognitivos.....	54
Figura 10	Representação de uma topologia centralizada com dois <i>clusters</i> para uma RRC real.	66
Figura 11	Metodologia de avaliação da solução proposta.	67
Figura 12	Arquitetura do protocolo SIRCo disposta em camadas.....	74
Figura 13	Visão Geral das funcionalidades do protocolo SIRCo.	76
Figura 14	Fluxo de mensagens entre três nós.....	78
Figura 15	Fluxo de ações do nó mestre em um ciclo completo.....	81
Figura 16	Implementação do nó mestre no GNU-Radio.	82
Figura 17	Motor cognitivo baseado em <i>RNA</i>	84
Figura 18	Fluxo de ações do nó escravo em um ciclo completo.	86
Figura 19	Implementação do nó escravo no GNU-Radio.....	87
Figura 20	Motor cognitivo do protocolo <i>CogMAC</i>	90
Figura 21	Motor cognitivo do protocolo <i>AHP</i>	91
Figura 22	Espectro local de 800MHz a 5.9GHz.....	95
Figura 23	Espectro local de 800MHz a 1.5GHz.....	96
Figura 24	Espectro local de 1.5GHz a 2GHz.....	97
Figura 25	Espectro local de 2GHz a 3GHz.	98
Figura 26	Espectro local de 3GHz a 5.9GHz.	99
Figura 27	Cenários de testes em ambiente fechado (<i>indoor</i>).	103
Figura 28	Taxa de Entrega para os Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando a estratégia LP	106
Figura 29	Latência em RTT para os Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando a estratégia LP	108

Figura 30	<i>Handoff</i> dos modelos de decisão para o Cenário (2) utilizando LP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.....	110
Figura 31	<i>Handoff</i> dos modelos de decisão para o Cenário (3) utilizando LP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.....	111
Figura 32	<i>Handoff</i> dos modelos de decisão para o Cenário (4) utilizando LP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP, (c) MDE-Cog e (d) RNA_SA.	112
Figura 33	Cenários de testes em ambiente externo (<i>outdoor</i>).....	113
Figura 34	Taxa de entrega de pacotes para os Cenário 1 (a), Cenário 2 (b) e Cenário 3 (c) considerando a estratégia LP	115
Figura 35	Latência em RTT para os Cenário 1 (a), Cenário 2 (b) e Cenário 3 (c) considerando a estratégia LP	116
Figura 36	<i>Handoff</i> dos modelos de decisão para o Cenário externo (1) utilizando LP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.....	118
Figura 37	<i>Handoff</i> dos modelos de decisão para o Cenário externo (2) utilizando LP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.....	119
Figura 38	<i>Handoff</i> dos modelos de decisão para o Cenário externo (3) utilizando LP dos módulos: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.	121
Figura 39	Taxa de Entrega para os Cenário 1 (a), Cenário 2 (b) e Cenário 3 (c) considerando a estratégia SLP.....	141
Figura 40	Latência em RTT para os Cenário 1 (a), Cenário 2 (b) e Cenário 3 (c) considerando a estratégia SLP.....	143
Figura 41	<i>Handoff</i> dos modelos de decisão para o Cenário (1): (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.	145
Figura 42	<i>Handoff</i> dos modelos de decisão para o Cenário (2) utilizando SLP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.....	147
Figura 43	<i>Handoff</i> dos modelos de decisão para o Cenário (3) utilizando SLP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Comparativo entre as plataformas.	58
Tabela 2	Composição dos Cenários de Teste	71
Tabela 3	Formatos das Mensagens.....	80
Tabela 4	Tipos de Mensagens <TIPO_MSG> de T1	80
Tabela 5	Critérios de julgamento utilizados no método AHP.....	92
Tabela 6	Média dos pesos dos critérios de julgamento utilizado no método AHP	93
Tabela 7	Usuários primários na região de Lavras - MG entre a frequência 800MHz a 1.5GHz.	96
Tabela 8	Usuários primários na região de Lavras - MG entre a frequência 1.5GHz a 2GHz.	98
Tabela 9	Usuários primários na região de Lavras - MG entre a frequência 2GHz a 3GHz.	99
Tabela 10	Usuários primários na região de Lavras - MG entre a frequência 3GHz a 6.2GHz.	100
Tabela 11	Configuração de Hardware.....	101
Tabela 12	Padrão de Tráfego.....	101
Tabela 13	Classes para a métrica de <i>handoff</i>	101
Tabela 14	Configuração da RNA	134

LISTA DE SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgement</i>
ADSD	<i>Automatic Distributed Spectrum Decision</i>
AE	Ambiente Externo
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AI	Ambiente Interno
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AG	Algoritmo Genético
BC	Base do Conhecimento
BER	<i>Bit Error Ratio</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CCC	Canal de Controle Comum
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CPCRA	<i>Cognitive Power-Controlled Rate-Adaptive MAC Protocol</i>
CTS	<i>Clear To Send</i>
DAB	<i>Direct Access Based</i>
CE	Compartilhamento do Espectro
DCC	Departamento de Ciência da Computação
DE	Decisão do Espectro
DSA	<i>Dynamic Spectrum Access</i>
DV	Descoberta de Vizinhos
FCC	<i>Federal Communicatios Commission</i>
GRUBI	Grupo de Redes Ubíquas
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
HMM	<i>Hidden Markov Model</i>
IA	Inteligência Artificial
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IRIS	<i>Implementing Radio in Software</i>
ISM	<i>Industrial, Scientifical and Medical</i>
MA	Motor de Aprendizagem
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MC	Motor Cognitivo
MCPA	<i>Markov-based channel prediction algorithm</i>
MDE	Modelo de Decisão do Espectro
ME	Mobilidade do Espectro

MG	Minas Gerais
NSF	<i>National Science Foundation</i>
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
MPL	<i>Multilayer Perceptron</i>
MR	Motor de Raciocínio
OSSIE	<i>Open-Source SCA Implementation - Embedded</i>
QoS	<i>Quality of Services</i>
RC	Rádio Cognitivo
RNA	Rede Neural Artificial
RRC	Rede de rádios Cognitivos
RSF	Rede Sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
RTS	<i>Request To Send</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SE	Sensoriamento do Espectro
SIRCo	Sensoriamento Inteligente para Rádios Cognitivos
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus Noise Ratio</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
US	Usuário Secundário
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UP	Usuário Primário
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização e Motivação	15
1.2	Definição do Problema	18
1.3	Objetivo	20
1.3.1	Objetivo Geral.....	20
1.3.2	Objetivos Específicos	20
1.4	Estrutura do Trabalho.....	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Rádio Cognitivo	22
2.1.1	Sensoriamento do Espectro (SE)	24
2.1.1.1	Detecção do Transmissor Primário.....	25
2.1.1.2	Detecção do Receptor Primário	26
2.1.1.3	Temperatura de Interferência.....	26
2.1.2	Decisão do Espectro (DE).....	27
2.1.2.1	Característica do Canal	27
2.1.3	Compartilhamento do Espectro (CE).....	28
2.1.3.1	Arquitetura do Compartilhamento do Espectro.....	29
2.1.3.2	Comportamento da Alocação do Espectro	30
2.1.3.3	Técnicas de Acesso ao Espectro	30
2.1.3.4	Escopo do Compartilhamento do Espectro	31
2.1.4	Mobilidade do Espectro (ME)	31
2.2	Controle de Potência	32
2.2.1	Protocolo de Controle de Potência Distribuído Baseado na Teoria do Jogos.....	33
2.2.2	Protocolo MAC com Controle de Potência e Taxa Adaptativa para Rádios Cognitivos	35
2.3	Inteligência Artificial	38
2.3.1	Motor Cognitivo.....	38
2.3.2	Redes Neurais Artificiais	39
2.3.2.1	Modelo de um Neurônio Artificial	39
2.3.2.2	Função de Ativação	41
2.3.2.3	Arquitetura de Rede.....	43
2.3.2.4	Perceptrons Multicamadas	47
2.3.3	Modelo Oculto de Markov	49
2.3.4	Algoritmos Genéticos	51
2.4	Protocolos MAC para Rádios Cognitivos	52
2.5	Plataformas para Rádio Cognitivo	55

2.5.1	GNU <i>Radio</i>	55
2.5.2	OSSIE	56
2.5.3	IRIS.....	57
2.5.4	ASGARD	57
3	TRABALHOS RELACIONADOS	60
4	METODOLOGIA	65
4.1	Módulos de Decisão do Espectro Avaliados.....	66
4.2	Classe Geradora de Tráfego.....	69
4.3	Métricas de Avaliação	70
4.4	Definição dos Cenários de Avaliação.....	71
5	SENSORIAMENTO INTELIGENTE PARA RÁ- DIOS COGNITIVOS	73
5.1	Arquitetura SIRCo.....	73
5.2	O protocolo SIRCo.....	74
5.2.1	Visão Geral	76
5.2.2	Tipos de Mensagens	78
5.2.3	Arquitetura do Nó Mestre	81
5.2.4	Arquitetura do Nó Escravo	85
5.2.5	AHP e CogMAC	90
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
6.1	Levantamento de Dados Local.....	94
6.2	Casos de Testes.....	100
6.2.1	Cenários <i>indoor</i>	102
6.2.1.1	Taxa de Entrega.....	104
6.2.1.2	Latência	107
6.2.1.3	Handoff.....	107
6.2.2	Cenários <i>outdoor</i>	113
6.2.2.1	Taxa de Entrega.....	114
6.2.2.2	Latência	115
6.2.2.3	Handoff.....	117
7	CONCLUSÃO	122
	REFERÊNCIAS.....	125
	APÊNDICE.....	132

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção, é apresentado o contexto em que se insere este trabalho, assim como o problema abordado e os fatores que justificam a busca por uma solução.

1.1 Contextualização e Motivação

Nos últimos anos, os dispositivos de comunicação sem fio, que utilizam a faixa *Industrial, Scientific and Medical* (ISM), tem crescido exponencialmente. Esses dispositivos têm sido usados no desenvolvimento de equipamentos para *Internet of Things* (IoT), aplicações multimídia, redes de sensores sem fio, acionamentos remotos, redes domésticas e uma infinidade de outras aplicações. Além disso, o desenvolvimento de diversas plataformas para dispositivos embarcados, que integram processador e rádio de comunicação, apontam para um futuro no qual haverá uma competição cada vez mais acirrada pelo uso do espectro na frequência ISM.

O espectro de frequência livre ISM compreende quatro faixas de frequências: 433MHz , 900MHz , $2,4\text{GHz}$ e $5,8\text{GHz}$. A faixa de frequência de $2,4\text{GHz}$ é amplamente utilizada em uma série de aplicações comuns (redes WiFi, redes de sensores, *Bluetooth*, telefones sem fio, entre outros) que devem coexistir. Atualmente a faixa de $5,8\text{GHz}$, assim como a faixa de $2,4\text{GHz}$, estão sendo amplamente utilizadas nas redes domésticas.

A coexistência de diferentes dispositivos e redes que operam na mesma frequência, ou em frequências adjacentes, pode causar interferências prejudiciais, limitando a operação dos dispositivos e até mesmo resultando no desligamento completo dessas redes (FERRARI et al., 2008). Atualmente, as frequências ISM nas faixas de $2,4\text{GHz}$ e $5,8\text{GHz}$ são as mais

utilizadas para o desenvolvimento de dispositivos ubíquos. Estudos mostraram que, em algumas regiões, o uso desse espectro de frequência é crítico, chegando a ter uma ocupação de até 90% (MCHENRY et al., 2006). Em 2006, Zhou, Stankovic e Son (2006) já previam que no horizonte de 5 - 10 anos o crescimento das redes de comunicação sem fio, usando as bandas ISM, sofreria problemas de sobreposição, o que poderia afetar amplamente o seu funcionamento.

Na tentativa de resolver o problema da coexistência nas frequências ISM, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) propôs alguns mecanismos para a coexistência entre dispositivos para as redes IEEE 802.15.1 WPAN e IEEE 802.11 WLAN como: alterar o acesso ao meio sem fio, tráfego de pacotes aleatórios, supressão de interferência determinística, seleção de pacote adaptativa, entre outros (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2003). No entanto, a maioria dos dispositivos atuais ainda não suporta parte dessas recomendações. Nas últimas décadas, as redes de telefonia celular e outros sistemas de comunicação sem fio, têm usado técnicas para permitir a coexistência de dispositivos baseadas na alocação dinâmica do espectro ou *Dynamic Spectrum Access* (DSA). Os mecanismos utilizados na DSA incluem sensoriamento de espectro para escolher o melhor canal/frequência disponível e reconfigurar dinamicamente o rádio. Estes mecanismos podem ser considerados a base de desenvolvimento dos rádios cognitivos ou inteligentes.

Os rádios cognitivos (RC) são capazes de explorar as faixas do espectro ocupadas por usuários licenciados (primários) e não licenciados (secundários). Segundo Akyildiz et al. (2008), Mitola (1999), Principe e Chalasani (2014), redes baseadas em RC podem ser construídas para prover alta banda

de transmissão para seus usuários em uma rede heterogênea com tecnologia DSA. Medições realizadas por Patil, Prasad e Skouby (2011) em grandes centros urbanos, mostraram que mesmo com a ocupação das faixas ISM e de faixas licenciadas, existe uma quantidade significativa de espectro que as redes baseadas em rádios cognitivos podem atuar de maneira oportunista.

As técnicas empregadas em RC devem considerar as diferenças entre os níveis de potência do rádio, a interferência entre as diferentes redes, a ausência de sincronização e a incompatibilidade das camadas físicas dos dispositivos. O grande desafio é desenvolver um protocolo de controle de acesso ao meio *Medium Access Control* (MAC) eficiente, que considere a coexistência entre redes heterogêneas (LASORTE; RAJAB; REFAI, 2012). Além disso, esse protocolo MAC também deve ser capaz de sensoriar o espectro de frequências, escolher o melhor canal e compartilhar essa decisão com seus vizinhos, sem alterar o consumo de energia, taxa de entrega ou latência.

As abordagens atuais utilizadas para o desenvolvimento das técnicas de RC têm sido baseadas, na sua grande maioria, em simulações, mas dispositivos de uso genérico como os rádios definidos por *software* ou *Software Defined Radio* (SDR) também têm sido empregados para aplicações e testes reais. As *Universal Software Radio Peripheral* (USRPs) são um tipo de SDR desenvolvido pela Ettus Research (ETTUS, 2014), capazes de lidar com amplas faixas do espectro. Podem ser empregadas em uma gama de aplicações como telefonia celular, rádio de segurança pública, transmissão de TV, Rádios Cognitivos e outros.

Entretanto, a tecnologia de rádios cognitivos é recente e não existem protocolos padronizados eficientes que garantam a coexistência entre

redes heterogêneas. Além disso, a maioria das pesquisas nessa área utiliza simulações para obtenção de resultados e existe um número reduzido de artigos que realizam testes em *hardware* (ZIA; QURESHI; SHAH, 2013). Tal lacuna na literatura caracteriza potenciais desafios para que novas arquiteturas e novos protocolos MAC baseadas em rádios cognitivos sejam criados e que seus testes possam ser realizados em *hardware*.

1.2 Definição do Problema

Considere duas redes heterogêneas como apresentado na Figura 1. A primeira rede é representada pelos usuários licenciados ou usuários primários (UP), usuários licenciados são aqueles que têm direito legal sobre a faixa de espectro em que os equipamentos estão trabalhando. Já a segunda rede é representada pelos usuários de rádio cognitivo (usuários RC). As elipses são as áreas de alcance dos sinais das duas redes heterogêneas. A zona mais escura da figura representa a interseção entre as duas redes. Nesta interseção pode ocorrer interferência entre os usuários RC e usuários licenciados.

No cenário apresentado na Figura 1, os usuários licenciados têm a preferência da faixa do espectro sobre os usuários RC. Para que um usuário RC consiga transmitir seus dados sem interferir com os UPs, é desejável que o mesmo tenha a capacidade de sensoriar o espectro na busca pela melhor frequência. Sensoriando o canal, o usuário RC consegue identificar buracos no espectro no qual os UP não estão utilizando ou que a interferência gerada pelos usuários RC nos UP seja mínima.

O espectro de frequências tem uma característica singular, a dinamicidade que varia de acordo com o tempo e geograficamente. Dessa forma, é

desejável manter um histórico de uso das faixas do espectro a fim de prever quando uma determinada frequência ficará livre para ser utilizada.

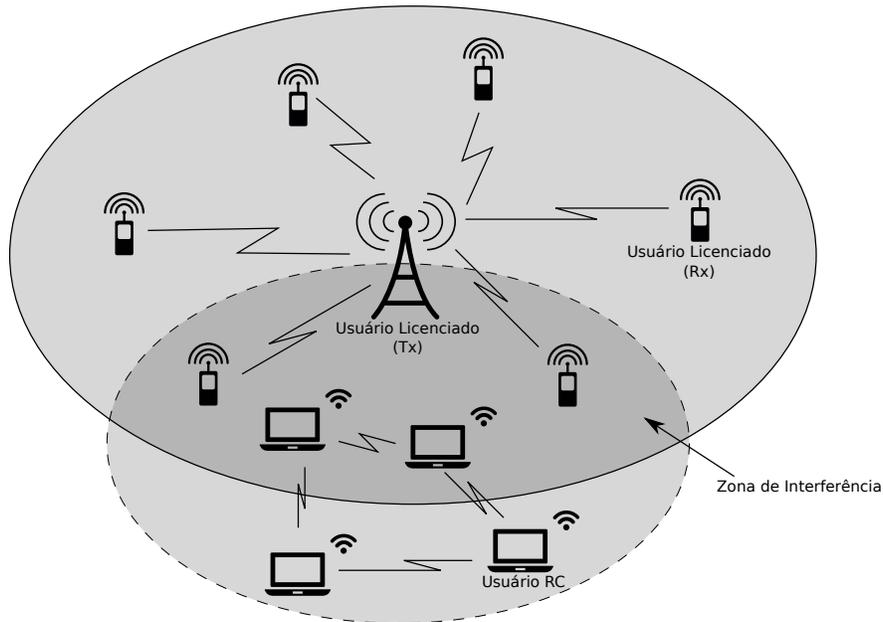


Figura 1 Rede heterogêneas - Cenário com interferência.

Uma rede RC que atende aos requisitos apresentados anteriormente tem que ser capaz de avaliar as informações coletadas no sensoriamento de espectro, a fim de identificar possíveis padrões de acesso na rede por parte dos UP para que não ocorra interferência nos mesmos.

Para o desenvolvimento do módulo cognitivo, é desejável que o método cognitivo empregado nesse módulo considere informações importantes para inferir qual é a melhor frequência para a Rede de Rádios Cognitivos (RRC), tais como: tempo de acesso do UP na faixa de espectro de frequência, quais são os UPs presentes em um determinado ponto geográfico e o padrão de utilização da faixa de espectro desejada.

Além disso, o método cognitivo deve considerar a dinamicidade do espectro, pois uma frequência livre no tempo x pode não estar livre no tempo y .

1.3 Objetivo

Esta seção descreve o objetivo geral deste trabalho assim como também o distribui em um conjunto de objetivos específicos a serem seguidos na elaboração da metodologia e na obtenção e avaliação de resultados.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma arquitetura para RRC, assim como um Modelo de Decisão do Espectro (MDE) que utiliza métodos cognitivos para a coexistência de várias Redes Sem Fio (RSFs) heterogêneas em um único ambiente. É proposto a utilização de técnicas de sensoriamento e decisão do espectro para RSF que possibilitem a otimização do espectro e que reduzam as interferências entre redes heterogêneas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Com o propósito de atingir o objetivo geral, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

1. Criar e treinar uma Rede Neural Artificial (RNA) capaz de considerar o histórico de utilização da faixa do espectro que compreende as frequências $800MHz$ a $5,8GHz$.
2. Acoplar a RNA ao *framework* GNU-Radio (BLOSSOM et al., 2016).

3. Desenvolver a arquitetura proposta de forma que possa ser acoplada no *framework* GNU-Radio e que possibilite vários MDEs.
4. Desenvolver um protocolo para que usuários RCs possam transmitir os seus dados de forma oportunista, utilizando as melhores frequências do espectro sem causarem interferências aos UPs.
5. Desenvolver um MDE baseado em RNA.
6. Implementar módulos da arquitetura proposta para o *framework* GNU-Radio tais como: módulo de sensoriamento do espectro, decisão do espectro, compartilhamento do espectro e mobilidade do espectro.
7. Adaptar MDEs tradicionais da literatura para comparação e testes com o MDE proposto.
8. Avaliar e comparar o desempenho dos MDEs desenvolvidos.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este documento está organizado como apresentado a seguir. Na Seção 2, são apresentados os conceitos básicos para a elaboração do objetivo proposto. Na Seção 3, são apresentados os trabalhos relacionados. Já na Seção 4, são apresentados os métodos, cenários e o protocolo proposto nesta pesquisa. Na Seção 5, é apresentada a arquitetura SIRCo. Já na Seção 6, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Na Seção 7, são apresentados as conclusões assim como os trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, são abordados os conceitos principais para a realização do trabalho. É apresentado, a definição do Rádio Cognitivo e seus principais componentes. Também são apresentados o funcionamento de alguns protocolos para controle de potência do rádio e as principais plataformas para desenvolvimento de SDR.

2.1 Rádio Cognitivo

Segundo a norma FCC 03-322 da *Federal Communications Commission* (FCC), RC é o rádio com a capacidade de alterar seus parâmetros de transmissão baseado na interação com o ambiente (FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION, 2003).

Para Mitola e Maguire (1999), RC é um paradigma de comunicação sem fio em que o rádio utiliza todos os recursos disponíveis de forma mais eficiente com a capacidade de se auto-organizar e se autorreconfigurar. Com isso, redes baseadas em RC são desenvolvidas para prover alta banda de transmissão para seus usuários em uma rede heterogênea com tecnologia de acesso dinâmico do espectro (AKYILDIZ et al., 2008; MITOLA, 1999; PRINCIPE; CHALASANI, 2014).

Esse espectro é composto por faixas licenciadas e não licenciadas. As faixas não licenciadas, ou seja, de acesso livre são denominadas como faixa ISM, que compreende quatro faixas de frequência: $433MHz$, $900MHz$, $2,4GHz$ e $5,8GHz$ (ZHOU; STANKOVIC; SON, 2006). Já as faixas licenciadas são destinadas aos usuários detentores do direito de usufruir desta faixa. Esses usuários são denominados de UPs.

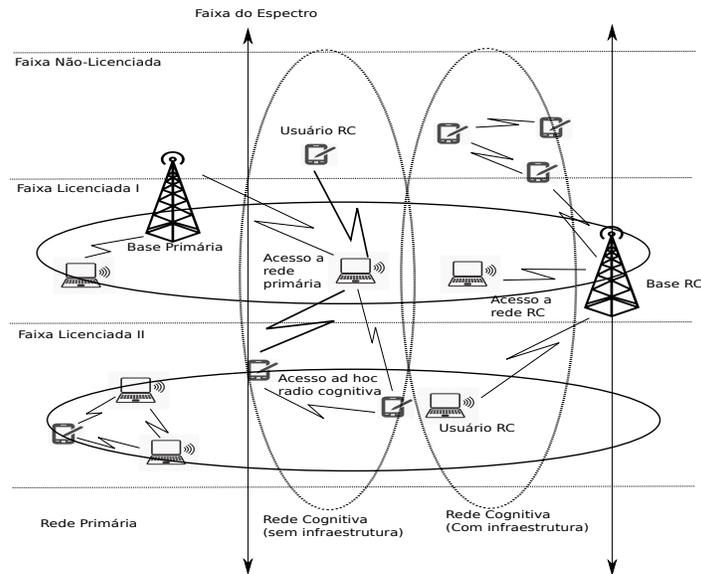


Figura 2 Arquitetura de uma rede cognitiva. Adaptada de Akyildiz et al. (2008).

Na Figura 2, observa-se a interação entre os usuários primários e os usuários de RC. Nesta figura, tem-se três tipos de acesso distintos:

1. *Acesso à rede RC* - usuários RC podem acessar suas próprias estações em ambos os espectros, tanto licenciado quanto não licenciado. Isso é possível já que todas as interações ocorrem dentro da rede RC. Para acessar o espectro licenciado, a rede RC deve empregar técnicas que minimizam a interferência nesse espectro.
2. *Acesso Ad Hoc* - usuários RC podem conectar entre si através de uma rede *ad hoc* em ambas as redes, primária e secundária. Sendo assim, a comunicação entre os usuários RC ocorre de forma direta com potência de transmissão diferente da utilizada pelo UP. Essa alteração da potência de transmissão minimiza a interferência incidente nos UP.

3. *Acesso à rede primária* - usuários RC podem também acessar a base primária através das faixas licenciadas utilizando protocolos de acesso da camada física. Portanto, os usuários RC terão que empregar protocolos para avaliar o meio de transmissão, a fim de não utilizar a mesma faixa do espectro que os UP estão utilizando.

Para Akyildiz et al. (2008), redes baseadas em RC devem atender a três requisitos básicos:

- Determinar quais porções do espectro estão disponíveis;
- Selecionar o melhor canal disponível;
- Liberar o canal quando um usuário primário é detectado.

Para atingir os três requisitos citados anteriormente, uma rede de RC deve empregar funcionalidades que facilitem o gerenciamento do espectro. Essas funcionalidades são: sensoriamento do espectro, decisão do espectro, compartilhamento do espectro e mobilidade do espectro (DUDLEY et al., 2014). Essas funcionalidades serão descritas a seguir.

2.1.1 Sensoriamento do Espectro (SE)

Para possibilitar a coexistência entre os UP e os usuários RC, é importante determinar quais regiões do espectro estão livres de ocupação ou interferência (AKYILDIZ et al., 2008). No SE os usuários RC se adaptam ao ambiente através da detecção de buracos no espectro que não causam interferência com os UP. Por isso, o SE é importante para construir uma rede baseada em RC (DUDLEY et al., 2014).

Um buraco no espectro, ou *hole*, é uma porção do espectro que é destinada ao UP que, não está em uso ou que não foi destinado a um UP.

Com isso, o usuário secundário pode utilizar essa porção de espectro para transmitir os seus dados (AKYILDIZ et al., 2008).

Akyildiz et al. (2008) classificam as tecnologias de SE em três grupos: detecção do transmissor primário, detecção do receptor primário e temperatura de interferência.

2.1.1.1 Detecção do Transmissor Primário

A detecção do transmissor é baseada na presença do sinal do UP no ambiente de observação do usuário RC. Geralmente, três esquemas de detecção de transmissor são usados: detecção do filtro combinado, detecção de energia e detecção de características (CABRIC; MISHRA; BRODERSEN, 2004; DUDLEY et al., 2014).

- **Detecção de filtro combinado:** Quando a informação do sinal do UP é conhecida pelo usuário RC, o usuário RC tem condições de aplicar esse filtro combinado para identificar qual UP está ocupando o espectro naquele momento.
- **Detecção de energia:** Se o usuário RC não tem informações sobre o UP, a alternativa é empregar um detector por energia. Se o usuário RC identificar energia no canal, então, o canal está ocupado por qualquer outro usuário.
- **Detecção de características:** Os sinais modulados são caracterizados pela periodicidade. Esta função pode ser detectada por meio da análise de uma função de correlação espectral (ONER; JONDRAL, 2007).

2.1.1.2 Detecção do Receptor Primário

A forma mais eficiente de detectar buracos no espectro é detectar os principais usuários que estão recebendo dados dentro do intervalo de comunicação de um usuário do RC. Como os usuários primários, geralmente, são estacionários, os dados da utilização do canal são fornecidos de forma geográfica. Com isso, em uma determinada área pode haver mais UP do que em outras áreas com menos concentração de UP.

Um dos componentes do rádio, o oscilador local, pode ser fonte de detecção falsa de receptores primários, pois esses osciladores podem emitir uma fonte de vazamento de sinal que pode ser interpretada como um receptor primário (WILD; RAMCHANDRAN, 2005). Osciladores imperfeitos não são capazes de construir frentes de onda que ocupem somente a largura do canal de operação, gerando assim essa fonte de vazamento. No entanto, o sinal de vazamento do oscilador local é normalmente fraco, a implementação de um detector de confiança não é trivial. Atualmente, este método só é viável na detecção de receptores de TV.

2.1.1.3 Temperatura de Interferência

A interferência pode ser controlada por meio da energia irradiada e por meio da localização dos transmissores individuais (AKYILDIZ et al., 2008). A FCC introduziu um modelo chamado de modelo de temperatura de interferência (FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION, 2003). Neste modelo, o usuário RC pode coexistir com os UP no mesmo espectro, desde que a interferência causada pelo usuário RC não ultrapasse o limite predeterminado, este limite é chamada de temperatura de interferência.

No Brasil, existe a resolução N^o506 da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) que define essas temperaturas de interferência (AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, 2007). Segundo essa resolução, equipamentos operando nas faixas de $5.2GHz$ e $5.4GHz$ deverão ser capazes de detectar sinais interferentes acima do limiar de $-62dBm$ para a potência irradiada de saída inferior a $200mW$ e limiar de $-64dBm$ para potências irradiadas de saída entre $200mW$ e $1W$.

2.1.2 Decisão do Espectro (DE)

As redes baseadas em RC necessitam decidir qual é a melhor faixa de espectro na qual os dados podem ser transmitidos sem prejudicar os UP (AKYILDIZ et al., 2008).

A decisão do espectro está fortemente relacionada com a característica do canal e com as operações dos usuários primários (MASONTA; MZYECE; NTLATLAPA, 2013). Para que ocorra a decisão do espectro existem dois passos. Primeiramente a faixa do espectro deve ser categorizada, não somente pela observação local do usuário secundário, mas também pelas informações estatísticas de acesso do UP (AKYILDIZ et al., 2008; LEE; AKYLDIZ, 2011). Em segundo lugar, baseado nessas informações, deve-se escolher a melhor faixa do espectro. Portanto, o canal deve ser classificado de acordo com as suas características.

2.1.2.1 Característica do Canal

Para definir qual faixa do espectro escolher, os usuários RC devem primeiramente encontrar buracos no espectro onde não há interferência com o UP (MASONTA; MZYECE; NTLATLAPA, 2013). Assim, cada buraco

no espectro deve ser caracterizado, considerando tanto a variabilidade do ambiente como os parâmetros do espectro (AKYILDIZ et al., 2008). A seguir são discutidos os principais parâmetros que representam o buraco no espectro segundo Akyildiz et al. (2008).

Interferência: A partir da quantidade de interferência no receptor principal, a potência utilizada pelo usuário RC pode ser reconfigurada.

Perda de caminho: A perda de caminho está intimamente relacionada com a distância e frequência. Com o aumento da frequência de operação, a perda do caminho aumenta, o que resulta em uma diminuição do alcance da transmissão. Se a potência de transmissão é aumentada para compensar o aumento de perda do caminho, a interferência para outros utilizadores pode aumentar.

Erros na camada de enlace: Dependendo do esquema de modulação e o nível de interferência do espectro, a taxa de erro do canal muda, pois os *bits* transmitidos no ambiente podem sofrer alterações decorrentes da interferência.

Atraso na camada de enlace: Para lidar com diferentes perdas de caminho, erro na camada de enlace e interferência, diferentes tipos de protocolos da camada de enlace são necessários em diferentes faixas do espectro (SAIFAN; KAMAL; GUAN, 2012). Isso resulta em diferentes atrasos da camada de enlace.

2.1.3 Compartilhamento do Espectro (CE)

Em redes cognitivas, o compartilhamento do espectro é natural. Essa funcionalidade requer a inclusão de características específicas em seu pro-

protocolo MAC (ZHANG; YU, 2010). Entretanto, redes cognitivas têm como característica singular a coexistência entre os usuários RC e os usuários licenciados UP.

Segundo Akyildiz et al. (2008), vários aspectos devem ser contemplados no desenvolvimento do compartilhamento do espectro. Esses aspectos foram divididos quanto à arquitetura, ao comportamento da alocação do espectro, às técnicas de acesso ao espectro e quanto ao escopo. A seguir serão enunciados cada um desses aspectos de acordo com Akyildiz et al. (2008).

2.1.3.1 Arquitetura do Compartilhamento do Espectro

A arquitetura do compartilhamento do espectro é dividida em compartilhamento do espectro centralizado e distribuído.

- **Compartilhamento do espectro centralizado:** Nesse método o compartilhamento é gerenciado por uma entidade central, mas o processo de detecção do espectro pode ser distribuído. No entanto, as informações para construir o mapa do espectro devem ser concentradas na entidade central do sistema.
- **Compartilhamento do espectro distribuído:** A definição do espectro é baseada nas medições locais de cada nó, essas medições são executadas por cada nó de forma distribuída (ZHAO et al., 2007).

A solução proposta emprega a técnica de compartilhamento do espectro centralizado, pois o compartilhamento do espectro é gerenciado por uma entidade central denominada nó mestre.

2.1.3.2 Comportamento da Alocação do Espectro

O comportamento da alocação do espectro pode ser classificado em cooperativo e não cooperativo.

- **Compartilhamento cooperativo do espectro:** Os nós trocam informações, de modo que cada nó conhece a interferência dos seus vizinhos. Geralmente, são formados *clusters* que concentram as informações de interferências locais e esses *clusters* comunicam entre si por meio de uma entidade central.
- **Compartilhamento não cooperativo do espectro:** Somente um nó é considerado neste compartilhamento, ou seja, o compartilhamento é baseado na interferência que um dado nó observa. Essa informação leva à incerteza e à redução do compartilhamento efetivo do espectro.

O protocolo proposto utiliza o compartilhamento cooperativo do espectro, pois o nó mestre concentra todas as informações da RRC.

2.1.3.3 Técnicas de Acesso ao Espectro

A técnicas de acesso ao espectro são divididas em sobreposição e subjacência do compartilhamento do espectro.

- **Sobreposição do Compartilhamento do Espectro:** Os nós de acesso à rede usam porções do espectro que não foram utilizadas pelos usuários licenciados. A sobreposição minimiza a interferência com a rede primária.

- **Subjacência do Compartilhamento do Espectro:** As técnicas de dispersão do espectro são exploradas de modo que o envio de um nó RC é considerado como ruído pelos usuários licenciados.

A solução proposta utiliza a sobreposição do compartilhamento do espectro, pois o módulo de decisão que utiliza RNA é capaz de identificar as faixas que estão sendo utilizadas pelos UPs e informar aos nós da RRC uma faixa livre que será capaz de atender aos requisitos de *Quality of Service* (QoS).

2.1.3.4 Escopo do Compartilhamento do Espectro

O escopo pode ser dividido em compartilhamento do espectro intra ou inter-rede.

- **Compartilhamento do espectro intrarrede:** Essa solução visa alocar o espectro entre as entidades das redes cognitivas minimizando assim a interferência com a rede primária e com os nós da RRC.
- **Compartilhamento do espectro inter-rede:** É o compartilhamento do espectro entre redes cognitivas distintas. Esse compartilhamento pode ser observado na Figura 2.

A solução proposta utiliza o compartilhamento do espectro intrarrede, porém se for empregado mais nós mestres o compartilhamento empregado é o inter-rede.

2.1.4 Mobilidade do Espectro (ME)

Uma etapa importante é a ME, pois após a rede cognitiva encontrar o melhor espectro, a atividade do usuário primário pode requerer essa mesma

porção do espectro. Assim, se o usuário primário necessitar dessa porção do espectro, o usuário cognitivo terá que migrar para outra porção livre do espectro (AKYILDIZ et al., 2008; CACCIAPUOTI; AKYILDIZ; PAURA, 2013).

Para que a mobilidade seja feita de maneira rápida e imperceptível para o usuário da rede cognitiva, protocolos de comunicação são utilizados para que a mobilidade tenha sucesso (CHEN; HONG, 2013).

Em Akan, Karli e Ergul (2009), a ME é também denominada de *handoff* do espectro. Quando é necessário mudar de canal, essa funcionalidade é ativada, sendo que esta mudança de canal não é perceptível para os usuários da rede cognitiva e não interfere com as atividades dos usuários da rede primária. Entretanto, quando se ativa o *handoff* do espectro essas operações adicionais podem gerar atrasos e conseqüentemente perdas de pacotes e degradação do espectro (SONG; XIE, 2012).

2.2 Controle de Potência

Como apresentado na seção 2.1 a tecnologia chave para os rádios cognitivos é o nível de interferência no espectro que o mesmo está operando.

Segundo Lin, Liu e Hsieh (2010), identificar o nível de interferência que o usuário primário tolera é fundamental para o bom funcionamento do RC. Controle de potência de transmissão é o ato de controlar a potência que determinados nós emitem no meio de transmissão, a fim de que, a transmissão de dados ocorra sem que haja interrupção da transmissão entre os nós primários de uma rede cognitiva. A seguir serão apresentados dois protocolos que primam pelo controle de potência de transmissão.

2.2.1 Protocolo de Controle de Potência Distribuído Baseado na Teoria do Jogos

O protocolo desenvolvido por Lin, Liu e Hsieh (2010) tem como objetivo maximizar a capacidade de transmissão dos usuários secundários sem que a interferência ocasionada aos usuários primários ultrapasse um *threshold* pré-determinado.

Primeiramente os autores deste protocolo consideraram a existência de nós monitores. Esses nós são responsáveis por monitorar a intensidade de ruído que existe no meio. Com isso, esses nós são capazes de detectar a temperatura de interferência que está incidente sobre usuários primários.

É considerado que o nó é um jogador e que cada estratégia de controle de potência é uma jogada neste jogo. Logo, o objetivo do jogo é transmitir um dado com uma determinada potência de transmissão sem interferir com as transmissões dos nós primários.

Esse protocolo é dividido em quatro etapas:

1. *Intervalo de Acesso (IA)*: É o intervalo de tempo destinado para que um possível transmissor secundário inicie ou participe do jogo. Cada transmissor é contemplado com um *slot* de tempo, em que cada *slot* é composto por tempo de transmissão (Tx-slot) e tempo de recepção (Rx-slot).

Para iniciar ou participar do jogo o nó envia um pacote de controle para o nó pretendido no seu Tx-slot. Esse pacote contém o endereço MAC de ambos os nós. Se o nó que recebeu esse pacote for capaz de decodificá-lo e não estiver transmitindo dados para outros nós, ele

responde ao nó remetente com um sinal na potência máxima (P_c) no Rx-slot.

Todos os nós que pretendem entrar no jogo deve ouvir continuamente o meio de transmissão. Com isso, o conjunto de jogadores que foram admitidos com sucesso para o jogo é conhecido por todos os jogadores. A ordem de entrada no jogo determina a ordem de transmissão no próximo passo.

2. *Intervalo de Ganho (IG)*: Esta etapa funciona de forma igual ao *Time Division Multiple Access (TDMA)*, em que o número total de *slots* é a soma do número de jogadores mais o número de sensores de monitoramento mais um.

Durante esta etapa, cada receptor envia um sinal com a potência P_c . A ordem de envio é determinada na etapa IA. A largura do tom enviado no *slot* de tempo é larga o suficiente para que o seu par possa detectar esse tom com precisão.

3. *Intervalo de Treinamento (IT)*: Neste intervalo ocorre o treinamento do nível de potência à ser utilizado. Assim, cada nó receptor e de monitoramento calculam a interferência do meio de transmissão. Após calcular essa interferência, os mesmos relatam para os seus pares o nível de potência que eles deverão usar na próxima rodada do jogo.

O jogo continua até que ocorra a convergência das potências de transmissão. Terminando o jogo, será possível que vários nós secundários transmitam a uma potência diferente das transmitidas pelos usuários primários. Com isso, a interferência gerada pelos usuários secundá-

rios não será alta o suficiente para que a comunicação entre os UP seja prejudicada.

4. *Intervalo de Dados (ID)*: Nesta etapa cada par de nó secundário envia seus dados com a melhor potência obtida na fase IT.

Embora esse protocolo seja promissor, como mostram os seus resultados, ele não foi testado em ambiente real. Ou seja, os níveis de interferência em um ambiente real podem fazer com que os níveis de potências sejam calculados erroneamente. Pois com a dinamicidade do espectro, ao final do jogo, a potência resultante pode não ser a que vá causar uma menor interferência no UP.

2.2.2 Protocolo MAC com Controle de Potência e Taxa Adaptativa para Rádios Cognitivos

O *Cognitive Power-Controlled Rate-Adaptive MAC Protocol (CPCRA)* é um protocolo desenvolvido por How, Ma e Qin (2009). O protocolo fornece serviço diferenciado para diferentes tipos de tráfegos. Para isso, o protocolo utiliza do controle de potência para melhor utilizar o meio de transmissão. Assim como o protocolo mencionado anteriormente, o CPCRA se baseia no ruído presente no canal para definir o nível de potência da transmissão.

O CPCRA proporciona a migração de canal quando as taxas de transmissão de dados são insuficientes. Assim, esse protocolo é utilizado em redes baseadas em rádio cognitivo.

Primeiramente, o CPCRA verifica se a técnica de controle de potência satisfaz o limite mínimo de ruído no meio - *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (SINR). Se for verdade, apenas o recurso de controle de

potência será ativado. Entretanto, se o controle de potência não for suficiente, o CPCRA ativa o módulo cognitivo que identifica um canal vago que suporte a taxa de transmissão de dados necessária. A principal vantagem de utilizar essas estratégias é que o atraso de sintonia requerido pelas redes de rádios cognitivos é minimizado se utilizado somente o controle de potência. Também pode ser verificado se ocorre a melhor distribuição do canal com o uso do módulo cognitivo.

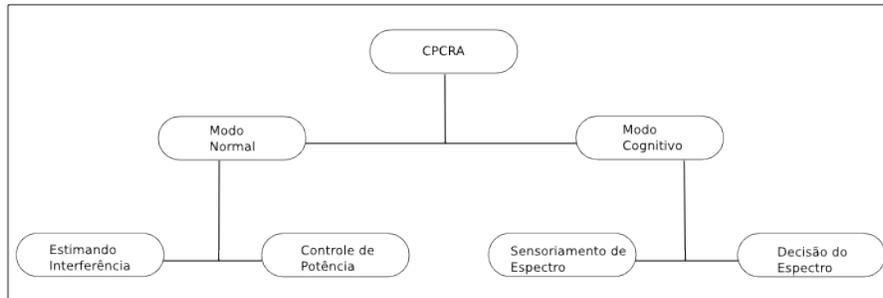


Figura 3 Protocolo CPCRA. Adaptada de How, Ma e Qin (2009).

O CPCRA funciona da seguinte forma:

1. *Estimando a Interferência*: Como pode ser observado na Figura 3, a etapa de estimação da interferência compreende o “Modo Normal”. Nessa etapa, o nó começa transmitindo um pacote *Request to Send* (RTS) para o nó pretendido. O nó destinatário recebe esse RTS e calcula o nível de ruído no meio de transmissão.
2. *Controle de Potência*: Nesta etapa, o nó que recebeu o RTS destinado a ele, nó B, calcula o nível de potência mínimo para que o nó originador do RTS, nó A, possa transmitir seus dados. Em seguida, o nó envia

um pacote contendo a potência que o nó A pode usar. Se o canal estiver poluído, com um nível de ruído alto, o nó B envia um pacote para o nó A contendo um canal de transmissão que não esteja poluído e que atende os requisitos mínimos para que ocorra a transmissão de dados. Esse novo canal é escolhido nas etapas do “Modo Cognitivo”.

3. *Sensoriamento de Espectro*: Nesta etapa, o nó executa o sensoriamento do espectro para verificar a quantidade de interferência presente no canal (Vide Subseção 2.1.1). Depois do processo de sensoriamento, um pacote CTS será enviado ao nó remetente com a nova frequência, a nova potência de transmissão e a taxa de transmissão dos dados.
4. *Decisão do Espectro*: Quando o nó remetente recebe o *Clear to Send* (CTS) da etapa 3, ele sintoniza o receptor para os novos parâmetros presente no pacote CTS. Após a alteração de canal, o nó destino envia um pacote *Frequency Change* (FC) para os seus vizinhos de um *hop*. Isso é feito para que futuras transmissões para esse nó sejam realizadas nesta nova frequência. O algoritmo também avalia se é realmente vantajoso ou não a troca de canal. Pois, dependendo da situação a transação não suporta o *delay* ou atraso de troca de canal.

Assim como o protocolo de Lin, Liu e Hsieh (2010), o CPCRA não foi implementado em nós reais. Com isso, não há como prever o seu comportamento em um ambiente onde o espectro altera o seu comportamento em uma pequena fração de tempo.

2.3 Inteligência Artificial

Nesta seção, são discutidas as principais técnicas de Inteligência Artificial (IA) aplicada aos RCs. Dentre as várias técnicas presentes na literatura, se destacam três técnicas principais que são aplicadas em larga escala para RC. São elas: RNA, *Hidden Markov Model* (HMM) e Algoritmos Genéticos (AG). Essas técnicas aplicadas em RC são essenciais para a construção do Motor Cognitivo (MC).

2.3.1 Motor Cognitivo

Segundo He et al. (2010), cognição em RC é definida como um processo para compreender a capacidade do rádio e do ambiente (consciência) em tomar decisões baseadas no processo de consciência (raciocínio), e por fim, aprender o impacto das ações sobre o desempenho do rádio, assim como o desempenho da rede. Esse processo é definido como “aprendizagem”.

Sharma e Bohara (2014) definem que o MC, tipicamente, contém três partes. O motor de raciocínio (MR), o motor de aprendizagem (MA) e a base do conhecimento (BC). A BC armazena predicados verdadeiros e conjuntos de ações disponíveis que interagem com o MR e o MA. A parte lógica do (e.g raciocínio) MR executa as ações disponíveis na BC que foram aprendidas, ou evoluídas, pelo MA através de uma função objetivo. A BC contém duas estruturas de dados. A primeira estrutura é a que armazena os predicados que são expressões lógicas para que possam ser avaliadas como verdadeiras ou falsas. Já a segunda estrutura é responsável por armazenar as ações que serão utilizadas para manipular os predicados.

Outros autores como Ge et al. (2008), Murray e Zaghoul (2014), Wenmiao (2009) definem MC de forma similar a Sharma e Bohara (2014)

com algumas alterações. Entretanto, a maioria dos autores concorda que para se construir um MC eficiente deve-se aplicar técnicas de IA juntamente com a RC. Nas próximas seções são discutidas algumas dessas técnicas.

2.3.2 Redes Neurais Artificiais

Rede Neural Artificial (RNA) é um modelo computacional inspirado no cérebro humano, que utiliza dados de entradas e saídas para gerar um mapeamento desejado entre o estímulo de entrada e a saída desejada (HAYKIN, 2001).

Para compreender uma RNA, são necessários a definição dos conceitos de neurônios, função de ativação, arquitetura de redes, perceptron de camada única e perceptron multicamadas. Nas seções posteriores serão apresentados esses conceitos segundo Haykin (2001).

2.3.2.1 Modelo de um Neurônio Artificial

Um neurônio é elemento responsável pelo processamento da informação que é de extrema importância para o funcionamento de uma rede neural artificial. Em um modelo de neurônio, são identificados três elementos básicos, são eles:

- *Sinapses ou elos de conexão*: Em cada sinapse ou elo, existe um peso. O sinal de entrada de um determinado neurônio é multiplicado pelo peso sináptico. Exemplificando, um sinal x_m na entrada da sinapse m conectada ao neurônio k é multiplicado pelo peso w_{km} . Os multiplicadores podem assumir valores positivos ou negativos.

- *Somador ou Combinador Linear*: É utilizado para somar os sinais de entrada ponderado pela respectiva sinapse do neurônio.
- *Função de Ativação*: Também conhecida como função restritiva. Essa função limita o intervalo de um sinal de saída. Tipicamente esse sinal é descrito como um intervalo normalizado unitário fechado $[0, 1]$ ou $[-1, 1]$.

Na Figura 4, são apresentados os três elementos básicos de um neurônio artificial. Adicionalmente, pode-se notar a presença de um elemento externo, denominado bias b_k . Este elemento externo tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada da função de ativação.

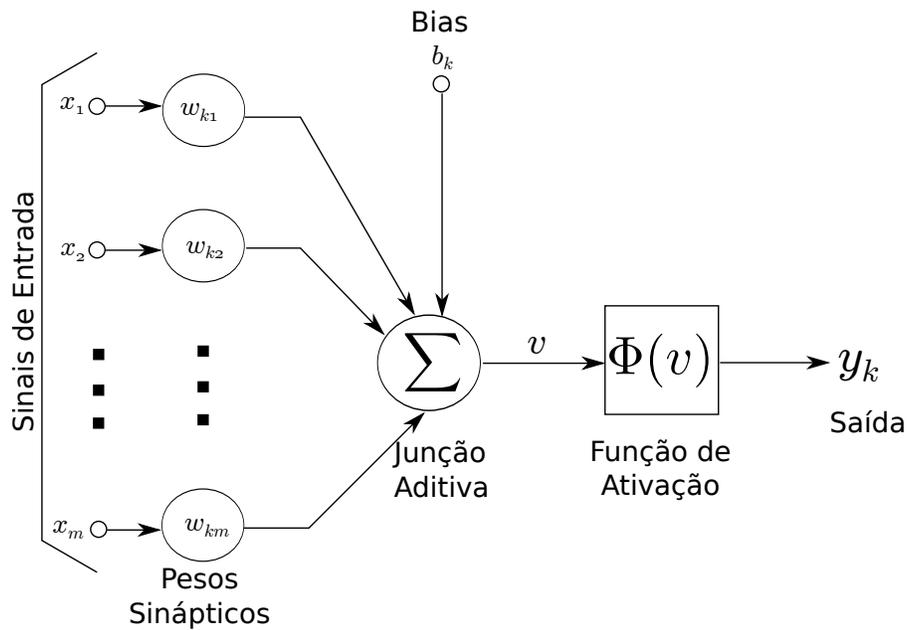


Figura 4 Modelo não-linear de um neurônio. Adaptado de Haykin (2001).

Existem três tipos básicos de função de ativação. Cada tipo de função de ativação é destinado para um propósito específico. Essas funções são apresentadas da Subseção 2.3.2.2.

2.3.2.2 Função de Ativação

A função de ativação, representada por $\Phi(v)$, define a saída de um neurônio em função do campo local induzido v . Abaixo são apresentadas três funções de ativação.

1. *Função de Limiar*: Essa função é representada pela equação 1.

$$\Phi(v) = \begin{cases} 1 & \text{se } v \geq 0 \\ 0 & \text{se } v < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Na literatura, essa função também é conhecida como *função de heaviside*. A *função de heaviside* ou função degrau assume valor 0 para argumentos negativos e valor 1 para argumentos positivos.

Na equação 2, está expressada a saída do neurônio k que emprega esta função limiar, na qual, v_k é o campo local induzido do neurônio.

$$y_k = \begin{cases} 1 & \text{se } v_k \geq 0 \\ 0 & \text{se } v_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Dessa forma, pode-se definir que

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj}x_j + b_k \quad (3)$$

na qual:

x_1, x_2, \dots, x_m são sinais de entrada;

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ são os pesos sinápticos do neurônio k ;

b_k é a bias e

v_k é o campo local induzido do neurônio k .

Esse neurônio é conhecido na literatura como modelo de *McCulloch-Pitts*. Neste modelo, a saída do neurônio assume 1 se o campo induzido daquele neurônio for menor que zero, e 0 caso contrário. Essa definição é conhecida como *propriedade tudo ou nada*.

2. *Função Linear por Partes*: Essa função é representada pela equação 4. Assume-se que o fator de amplificação dentro da região linear é unitário. Se a região linear é mantida sem entrar em saturação, surge um combinador linear. Essa função pode ser reduzida à função de limiar se o fator de amplificação da região linear for feito infinitamente grande.

$$\Phi(v) = \begin{cases} 1 & \text{se } v \geq +\frac{1}{2} \\ v & \text{se } v + \frac{1}{2} > v > -\frac{1}{2} \\ 0 & \text{se } v \leq -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (4)$$

3. *Função Sigmoidal*: A função sigmoide é a função mais comumente utilizada na elaboração de redes neurais artificiais. Neste trabalho, optou-se por utilizar essa função como função de ativação da RNA proposta para classificar as frequências de uma faixa do espectro.

A função sigmoide, cujo gráfico tem a forma de s, é uma função crescente que apresenta o balanceamento adequado entre o comporta-

mento linear e o não linear. A *função logística* da equação 5 é um exemplo de função sigmoide

$$\Phi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)} \quad (5)$$

em que a é o parâmetro de inclinação da função sigmoide. Variando-se a , obtém-se funções sigmóides com diferentes níveis de inclinação. Se o parâmetro a se aproximar do infinito, a função sigmoide se assemelha à função limiar com valores contínuos entre 0 e 1. Uma característica importante das funções sigmóides é o fato de serem diferenciáveis.

Todas as funções de ativação apresentadas (equações 2, 4 e 5) são definidas no intervalo de 0 a 1. Se for desejável, o intervalo definido pode ser estendido entre -1 a $+1$. Na Função Limiar, pode-se utilizar a *função sinal* a fim de se estender o intervalo entre -1 a $+1$. Já na Função sigmoide pode-se utilizar a *função tangente hiperbólica*, definida por

$$\Phi(v) = \tanh(v) \quad (6)$$

Uma função sigmoide que assume valores negativos possibilita benefícios analíticos.

2.3.2.3 Arquitetura de Rede

Nesta seção são apresentadas as arquiteturas comumente utilizadas para uma RNA, segundo Haykin (2001). Para se utilizar as arquiteturas, deve-se considerar o algoritmo de aprendizagem utilizado.

1. *Redes Alimentadas Adiante com Camada Única*: Nesse tipo de rede, os nós computacionais (neurônios) são dispostos em camadas, onde tem-se uma camada de entrada, nós fontes, e uma camada de saída, neurônios de saída. O fluxo dos sinais são na direção da camada fonte para a camada de saída, não vice-versa. Esse tipo de rede é estritamente alimentada adiante ou acíclica. Na Figura 5, é apresentado esse tipo de rede, nela tem-se 4 nós de entrada e 4 nós de saída. A rede é denominada de *camada única*, pois só existe uma camada de saída. A camada de entrada de nós fontes não é considerada, pois nela, não é realizada nenhum ato computacional.

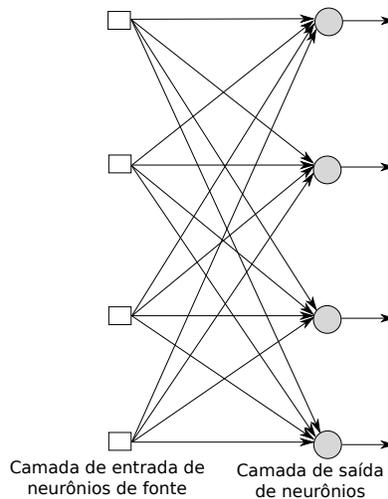


Figura 5 Rede alimentada adiante ou acíclica com uma única camada de neurônios. Adaptada de Haykin (2001).

2. *Redes Alimentadas Diretamente com Múltiplas Camadas*: Esta rede se diferencia da rede acíclica com uma única camada pela presença de uma ou mais camadas ocultas posicionadas entre a camada de nós fontes e a camada de neurônios de saída. Com o adicionamento de

camadas ocultas, a rede é capaz de coletar informações estatísticas mais precisas, ou seja, a rede adquire uma perspectiva global devido ao aumento de números de sinapses entre os neurônios das camadas ocultas.

Os sinais de entrada na camada de nós fontes são utilizados como sinais de entrada para a primeira camada oculta. A segunda camada oculta recebe, como alimentação, os sinais de saída da primeira camada oculta. Esse processo é repetido até que os sinais atinjam a camada de saída. A Figura 6 representa uma rede com a arquitetura acíclica com múltiplas camadas ocultas.

Uma rede é dita totalmente conectada quando todos os nós dessa rede apresentam conexões sinápticas com todos os nós adjacentes dessa rede. Entretanto, quando essa condição não é satisfeita a rede é dita parcialmente conectada.

3. *Redes Recorrentes*: Redes recorrentes, ao contrário das redes alimentadas adiante, possuem pelo menos um laço de realimentação.

Na Figura 7, é apresentado um exemplo de arquitetura de rede recorrente, em que a rede é constituída de apenas uma camada de neurônios. Os sinais de saída de cada neurônio alimenta as entradas de todos os outros neurônios. Nesse exemplo não há laços de retroalimentação. A retroalimentação só ocorre quando um sinal de saída de um neurônio alimenta a sua própria entrada, fato que não ocorre na Figura 7.

Na Figura 8, é apresentado um exemplo de rede recorrente com camada oculta. Tanto na Figura 7 quanto na Figura 8 há a presença de operadores de atraso unitário que impactam no processo de aprendi-

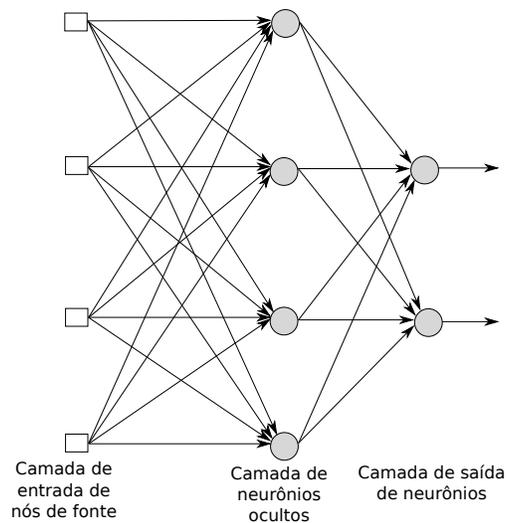


Figura 6 Rede alimentada adiante ou acíclica totalmente conectada com uma camada oculta e uma camada de saída. Adaptada de Haykin (2001).

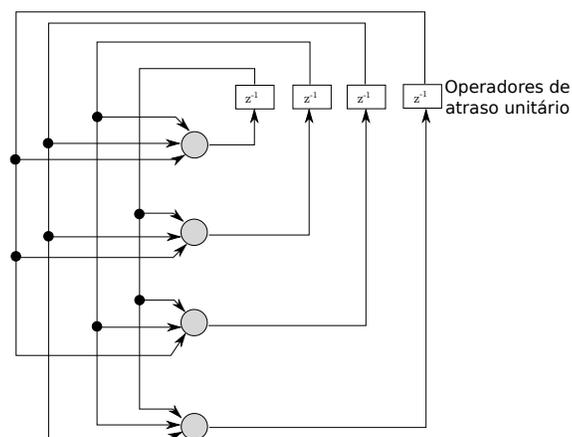


Figura 7 Rede recorrente sem laços de auto-realimentação e sem neurônios ocultos. Adaptada de Haykin (2001).

zagem de uma rede neural, representados por z^{-1} . Esses operadores garantem que a rede assuma um comportamento dinâmico não linear.

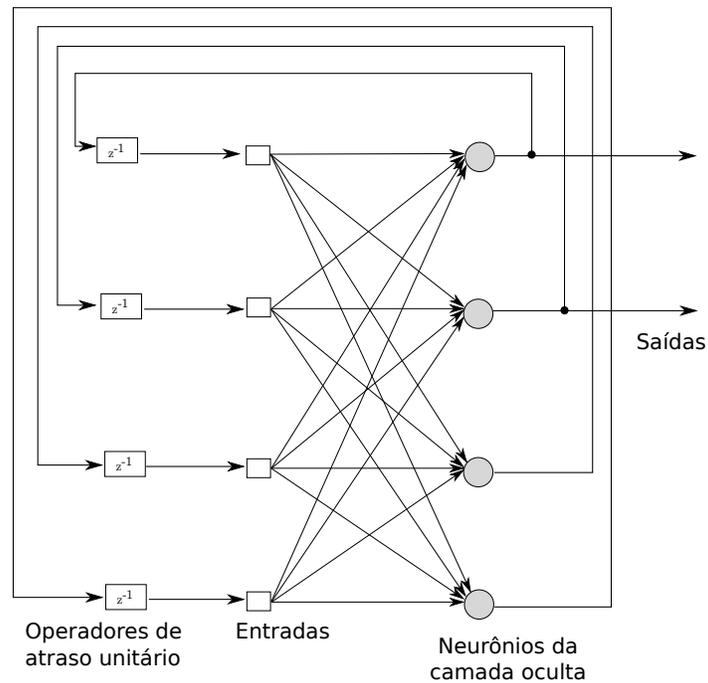


Figura 8 Rede recorrente com neurônios ocultos. Adaptada de Haykin (2001).

2.3.2.4 Perceptrons Multicamadas

Segundo Haykin (2001), a arquitetura de redes neurais com múltiplas camadas alimentadas adiante são as mais utilizadas em diversos problemas complexos. Essa rede é constituída de uma camada de entrada (nós fontes), pelo menos uma camada oculta e uma camada de saída. Os sinais de entrada se propagam da camada de entrada em direção à camada de saída passando pelas camadas ocultas. Redes neurais desse tipo são comumente denominadas de *perceptrons de múltiplas camadas* (*multilayer perceptron - MLP*).

Redes MLP têm sido aplicadas com sucesso para resolução de diversos problemas com complexidade elevada. O treinamento dessas redes ocorre de forma supervisionada, no qual é utilizado o algoritmo de retropropagação de erro (*error back-propagation*). Especificamente, o algoritmo de retro-propagação se baseia em dois passos através das diferentes camadas da rede.

O primeiro passo é o da propagação, em que um sinal de entrada é propagado pelos nós sensoriais da rede, camada por camada. Nesse passo, os pesos sinápticos são fixos assim, um conjunto de saídas é produzido como a resposta real da rede. No segundo passo, retropropagação, o conjunto de saída obtido no passo de propagação é utilizado para atualizar os pesos sinápticos de toda a rede de acordo com a regra de correção de erro. A RNA implementado no modelo de decisão do espectro utiliza a regra do *erro quadrático médio*. Basicamente, a resposta real da rede é subtraída pela resposta desejada, já que redes MLP tem o treinamento supervisionado, para produzir um sinal de erro. Esse sinal é retropropagado pela rede, na direção contrária das conexões sinápticas. A técnica de retropropagação auxilia a rede a fim de encontrar a resposta mais próxima possível da resposta desejada.

Para implementação de um perceptron de múltiplas camadas, deve-se atender a três requisitos básicos:

1. A função de ativação de uma rede MLP deve incluir uma função não linear. Com isso, a função não apresenta limitações pois ela é diferenciável em qualquer ponto. A função comumente utilizada para esse

fim é a função sigmoide definida pela função logística

$$y_j = \frac{1}{1 + \exp(-v_j)} \quad (7)$$

em que:

v_j é o campo local induzido (soma ponderada de todas as entradas sinápticas acrescidas da bias) do neurônio j ;

y_j é a saída do neurônio.

2. A rede deve conter uma ou mais camadas de neurônios ocultos. Essas camadas extraem gradativamente as características mais significativas dos padrões de entrada. A rede MLP implementada no MDE-RNA possui duas camadas ocultas e uma camada de saída.
3. Alto nível de conectividade determinado pelas sinapses da rede. Na RNA implementada no MDE-RNA, cada camada contém 34 neurônios, garantindo assim um alto grau de conectividade.

2.3.3 Modelo Oculto de Markov

O Modelo Oculto de Markov (*Hidden Markov Models* - HMM) é um sistema de transições de estados, em que o estado futuro depende unicamente do estado atual. O termo “Oculto” refere-se ao fato de que esse modelo é dinâmico e seus parâmetros ocultos não podem ser diretamente observados. O HMM gera sequências de símbolos observáveis, ocorrendo a transição de estado em estado utilizando um símbolo por transição. Os estados estão escondidos e só a saída pode ser observada (RABINER, 1989).

O Modelo de Markov pode ser definido na forma compacta

$$\lambda = (A, B, \pi(1)) \quad (8)$$

em que: A é uma matriz que representa o estado de probabilidade de transição de dimensões $N \times N$; B é uma matriz que representa a probabilidade de símbolos observáveis de dimensões $K \times N$; $\pi(1)$ é um vetor de estados iniciais de dimensões $N \times 1$; N é o número de estados; e K é o número de símbolos de observações distintas para cada estado.

Segundo Rabiner (1989), existem três problemas de HMM que pode ser aplicado no mundo real, são elas:

Problema de avaliação e reconhecimento: Considerando os parâmetros da equação 8, calcula-se a probabilidade de se obter uma sequência de observação particular. O *forward-backward* é um algoritmo de HMM que pode calcular essa probabilidade (BAUM et al., 1970).

Problema de decodificação: Considerando os parâmetros da equação 8, encontra-se a sequência de estados ocultos que melhor explica a sequência de observação. O algoritmo de Viterbi pode ser usado para resolver tal problema (FORNEY, 1973). Esse algoritmo é especialmente utilizado para decifrar códigos convolutivos utilizado tanto no protocolo *Code Division Multiple Access* (CDMA) (MILLER; KWONG, 2012) e telefonia digital *Global System for Mobile* (GSM) como em: modems, satélites, comunicações no espaço profundo, no padrão IEEE 802.11 (CYPRIANI et al., 2009) entre outras aplicações.

Problema de formação ou aprendizagem: Dada uma sequência de observação estimar um λ utilizando essa sequência. Esse é um subconjunto do algoritmo expectativa máxima, desenvolvido por Dempster, Laird e Rubin (1977), utilizado em estatística para encontrar a máxima verossimilhança de parâmetros em modelos estatísticos.

2.3.4 Algoritmos Genéticos

Algoritmo Genético (AG) é um algoritmo de computação evolutiva inicialmente proposto por Holland (1975). AGs são capazes de identificar e explorar fatores ambientais e convergir para soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas em níveis globais. Por ser baseados em fundamentos teóricos da biologia, o conceito de seleção natural está intimamente relacionado com os AGs.

Para Darwin (2009), seleção natural é um processo que atua continuamente em todos os indivíduos de um ambiente, selecionando as variações mais aptas para aquele ambiente, no que se refere ao melhoramento genético do indivíduo. Esse processo repele as variações nocivas, e conserva as variações úteis para a evolução de um determinado indivíduo. Entretanto, as variações nocivas são mantidas na população a uma taxa menor de transferência para os indivíduos das gerações posteriores, pois mesmo que existam variações nocivas elas podem ser úteis em um determinado momento da existência de uma espécie. A evolução é considerada como benéfica quando o indivíduo se torna mais adaptado ao meio em que está inserido do que seus pares. Para essa variação ocorrer, são necessárias várias gerações e muitos anos de contínua seleção natural.

Na natureza, o processo evolutivo ocorre quando quatro condições fundamentais são satisfeitas (KOZA, 1992):

- O indivíduo tem a capacidade de se reproduzir;
- Há uma população de indivíduos que se autoreproduzem;
- Há variedade entre os indivíduos que se autoreproduzem;
- A capacidade de sobrevivência no ambiente está associado à variedade.

A variedade citada anteriormente se manifesta como variação nos cromossomos dos indivíduos da população, ou seja, no nível molecular. Essa variação é considerada um gene pertencente a um determinado DNA. Neste DNA, está contido todas as informações necessárias para a representação de um indivíduo.

Basicamente um AG é constituído de componentes como, a representação do indivíduo, o método de seleção, uma função de avaliação (*fitness*) e alguns operadores genéticos (KOZA, 1992).

2.4 Protocolos MAC para Rádios Cognitivos

Os protocolos *Medium Access Control* ou MAC são protocolos que controlam o acesso ao meio físico da rede. Para rádios cognitivos, esses protocolos devem ser projetados considerando as principais funcionalidades de uma rede de RC, como foi apresentado na Seção 2.1.

Segundo Gavrilovska et al. (2014), os protocolos MAC cognitivos, precisam atender a quatro requisitos básicos para que a rede RC funcione efetivamente, são eles:

Transparência entre os usuários primários e os secundários:

Protocolos MAC cognitivos devem garantir que o sistema secundário não afete nas atividades do sistema primário, o sistema secundário deve ser transparente e inofensivo para o sistema primário. Com isso, pode-se garantir os requisitos de QoS do sistema primário.

Acesso às informações do ambiente: Protocolos MAC cognitivos devem ter acesso às informações do ambiente que o rádio coleta através dos usuários secundários permitindo assim, o gerenciamento efetivo do espectro.

Estratégias para o compartilhamento do espectro: Como citado nas seções anteriores, o compartilhamento do espectro para redes RC é importante, pois tanto o usuário primário quanto o secundário irão partilhar o mesmo espectro. Os protocolos MAC cognitivos devem garantir o acesso ao espectro de forma dinâmica e eficiente alocando recursos que visam otimizar o desempenho do sistema como um todo. Com isso, a *QoS* dos UP e usuários secundários é garantida.

Mecanismos de controle: Protocolos MAC cognitivos devem gerenciar a disseminação de dados de controle por meio da identificação, definição, criação e gestão confiável do canal.

Domenico, Strinati e Benedetto (2012) separam os protocolos MAC para rádios cognitivos em duas grandes categorias: os que são baseados em acesso direto (*Direct Access Based* - DAB) e os que são baseados em alocação dinâmica de espectro (*Dynamic Spectrum Access* - DSA). Na Figura 9, observa-se essa divisão.

Os protocolos baseados em acesso direto são categorizados em:

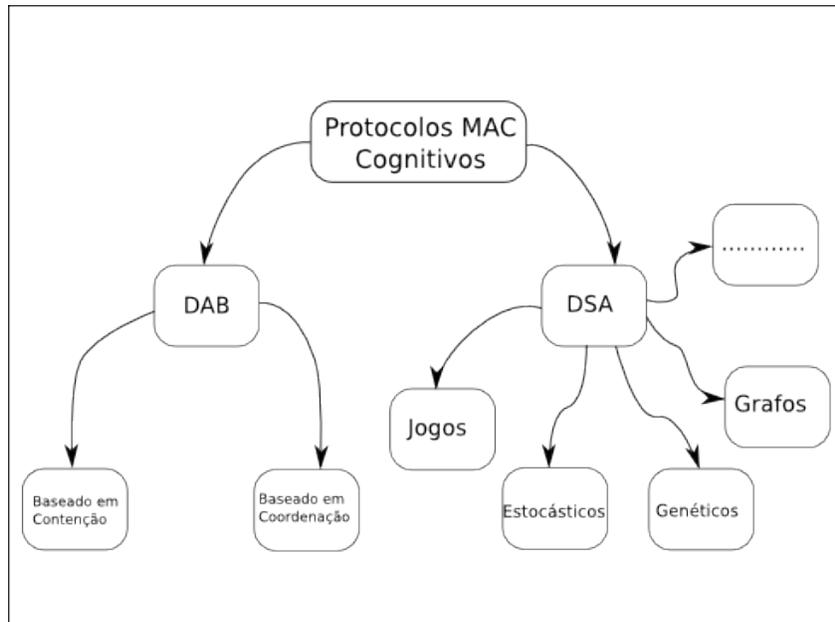


Figura 9 Divisão dos protocolos para MAC cognitivos. Adaptado de Domenico, Strinati e Benedetto (2012)

Protocolos baseados em contenção: Remetentes e destinatários trocam informações para definir em qual canal ocorrerá a transmissão.

Protocolos baseados em coordenação: Cada nó compartilha suas informações referente ao uso do canal com os seus vizinhos para aumentar a confiabilidade de detecção, e melhorar o desempenho geral do sistema.

Já os protocolos baseados em alocação dinâmica do espectro, tendem a explorar o espectro de forma inteligente, onde são utilizados algoritmos de otimização para que o espectro disponível seja distribuído de forma inteligente e justa entre os nós da rede. Cada nó terá que adaptar os seus parâmetros de transmissão, modulação, potência de transmissão, frequên-

cia de operação e também terá que se adaptar às mudanças do ambiente. Exemplo de algoritmos de otimização podem ser encontrados na Seção 2.3.

2.5 Plataformas para Rádio Cognitivo

Nesta seção, são apresentadas as principais plataformas para desenvolvimento de rádio definido por *software* (SDR). Um SDR é definido como um dispositivo em que a operação dos parâmetros dos transmissores é definida por *software*, assim o rádio pode ser programado para suportar diferentes formatos de transmissão em diferentes frequências. Como os rádios cognitivos devem alterar os seus parâmetros, programá-los para que essa alteração ocorra pode ser dispendioso. Contudo, ferramentas de programação facilitam o desenvolvimento de *software* para rádios cognitivos. Com isso, essa seção se destina a plataformas para o desenvolvimento de SDR. Ao final é apresentado um comparativo entre as plataformas apresentadas.

2.5.1 GNU *Radio*

A ferramenta *GNU Radio* é um *software* livre de código aberto que oferece blocos de processamento de sinais para a implementação de SDR (BLOSSOM et al., 2016). Essa ferramenta pode ser utilizada com um *hardware* de rádio frequência de baixo custo, ou sem *hardware* externo em um ambiente controlado de simulação.

As aplicações em *GNU Radio* são desenvolvidas em linguagem de programação Python. Já para as funções de processamento de sinais, que são geralmente funções de baixo nível, é utilizada a linguagem de programação C++. Com isso, o desenvolvedor pode criar funções de desempenho rápido. O *GNU Radio* utiliza a técnica de fluxo gráfico, em que os vértices

são blocos de processamento de sinal (funções) e as arestas representam os sentidos de fluxo de dados entre as funções.

Existem artigos na literatura que utilizaram esta ferramenta (MASONTA; MZYECE; MEKURIA, 2012), reforçando assim a escolha do mesmo.

O *GNU Radio* funciona de forma eficiente com os *hardware* da Ettus (2014), *Universal Software Radio Peripheral* (USRP). Pois a própria Ettus Research provê compatibilidade de suas placas USRP com a ferramenta *GNU Radio*.

A Ettus Research, uma empresa da National Instruments, é a líder mundial no fornecimento de plataformas para SDR. Seu principal produto são as USRP. As USRP são plataformas de SDR de alta qualidade e de baixo custo, permitindo aplicações industriais, acadêmicas e de defesa. Essas plataformas são equipadas com interfaces RF de até *6GHz*, GPS, MIMO e sistemas embarcados. Suas áreas de aplicações são variadas, como exemplo tem-se: Telefonia celular; Rádio de segurança pública; Transmissão de TV; entre outros (ETTUS, 2014).

2.5.2 OSSIE

A ferramenta *Open-Source SCA Implementation - Embedded* (OSSIE) é um *software* de código aberto para desenvolvimento de SDR mantido pelo *Virginia Tech* com o apoio da *National Science Foundation* (NSF) (TECH, 2014). Seu *core* é desenvolvido na linguagem C++.

O OSSIE oferece blocos de processamento de sinais e códigos para interfaces de dispositivos. Além disso, oferece integração com o IDE Eclipse

através de *plug-ins* que podem ser integrados com o *GNU Radio* (MASONTA; MZYECE; MEKURIA, 2012).

2.5.3 IRIS

O *Implementing Radio in Software* (IRIS) é um *software* para rádios cognitivos de propósito geral. Ele pode ser utilizado para criar SDR reconfigurados em tempo real. Foi desenvolvido e mantido pela Universidade de Dublin (MACKENZIE et al., 2003).

Desenvolvido em C++, o IRIS oferece métodos de configuração baseados na linguagem de marcação *Extensible Markup Language* (XML). O XML é usado para especificar características que podem ser configuradas dinamicamente para que cumpram os critérios de comunicação pré-estabelecidos. Assim como as outras duas ferramentas, o IRIS também apresenta o conceito de fluxo gráfico sendo comparativamente melhor que a ferramenta *GNU Radio*, no quesito fluxo gráfico. O IRIS pode ser utilizado com praticamente todos os *hardwares* de rádio frequência *front-end* que existem no mercado (MASONTA; MZYECE; MEKURIA, 2012).

2.5.4 ASGARD

A plataforma ASGARD possui uma arquitetura flexível que utiliza a programação orientada a objetos C++ permitindo a criação de um simples componente de processamento de dados e garante a ordem desejada de execução.

Segundo University (2014), a plataforma é dividida em quatro elementos:

- **Componentes:** Um componente de processamento tem função específica aplicada em entradas de dados. Não existem restrições de tipos de entradas de dados.
- **Módulo:** Elemento que permite carregar um ou vários componentes, é responsável por determinar como a tarefa de processamento de dados deve ser executada no tempo.
- **Aplicativo:** Responsável por especificar as interconexões entre os componentes e como eles são distribuídos ao longo do módulo. Este elemento possui o mais alto nível de abstração, podendo até lidar com carregamento de informações através de arquivos XML.
- **Objeto de Comunicação:** Oferece a comunicação entre dois ou mais componentes, assim como a interação entre módulos.

A seguir tem-se o comparativo entre as plataformas de desenvolvimento de SDR:

Tabela 1 Comparativo entre as plataformas.

Características	GNU Radio	OSSIE	IRIS	ASGARD
Linguagem	C++/Python	C++	C++/XML	C++/XML
Difusão	Muito Alto	Alto	Alto	Médio
Compatível com RF front-end	Todas (indicado para USRP)	Todas	Todas	Todas
Fluxo Gráfico	SIM	SIM	SIM	NÃO

Na Tabela 1, observa-se algumas características das plataformas apresentadas nesta seção. O *software* escolhido para este trabalho foi o *GNU Radio* pois, além de ser livre de custos ele foi recomendado pela *Ettus Research* para a utilização das placas USRP.

A seguir são apresentados os trabalhos relacionados ao protocolo proposto neste trabalho.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, são apresentados os trabalhos relacionados incluindo várias técnicas de otimização para a construção de um motor cognitivo (vide Seção 2.3.1). Esse motor cognitivo é utilizado para o modelo de decisão do espectro. As técnicas empregadas no desenvolvimento do núcleo cognitivo são baseadas em algoritmos que utilizam abordagens determinísticas e em algoritmos que empregam heurísticas como aprendizagem de máquina e inteligência artificial.

Como exemplo de algoritmos de abordagem determinísticas, tem-se o CogMAC, criado por Ansari, Zhang e Mähönen (2010) e o CogMAC+, que foi desenvolvido por Wang et al. (2014) sendo uma extensão do CogMAC, porém seu funcionamento é descentralizado. Basicamente esses dois algoritmos funcionam da seguinte forma: antes de enviar um quadro, o transmissor verifica o ambiente a fim de descobrir se não tem outro transmissor enviando um dado em algum canal. Essa verificação é feita por meio de um algoritmo para selecionar o canal apropriado. Após esse processo, o transmissor envia seu primeiro pacote de forma repetitiva no canal que foi selecionado. Esse processo foi adotado a fim de reservar o canal para a transmissão, já que o protocolo trabalha de forma *half-duplex*. O transmissor não pode escanear o canal ao mesmo tempo que transmite um dado, isso pode causar interferências no UP. Para sanar esse problema, o transmissor, depois de enviar um pacote, verifica o canal para então transmitir o segundo pacote.

Considerando a dinamicidade do espectro e as múltiplas variáveis presente neste trabalho, algoritmos determinísticos podem não ser uma estratégia viável. Foi implementado uma versão do CogMac para que o seu desempenho seja comparado com o algoritmo proposto neste trabalho. A

versão implementada considera somente a leitura de RSSI (*Received signal strength indication*) do espectro para escolher o canal mais apropriado.

Como abordagens que utilizam técnicas de aprendizagem e/ou inteligência artificial, têm-se: os algoritmos genéticos, modelos ocultos de Markov (Seção 2.3.3), modelos baseados em AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e modelos baseados em RNAs.

Algoritmos genéticos são uma alternativa para a construção desses motores cognitivos. Para He et al. (2010), os algoritmos meta-heurísticos, especialmente os AG, têm sido adotados amplamente na literatura para lidar com problemas de otimização multiobjetivos, pois considerando a dinamicidade do ambiente em que as redes RC são incorporadas, os AGs são desejáveis para se construir o MC já que o problema de alocação do espectro pode ser um problema de otimização.

Kumar et al. (2013) utilizam a técnica de AGs para implementar um motor cognitivo. Os autores propuseram uma função objetivo que considera a potência de transmissão, taxas de erro de *bit* (*Bit Error Ratio* - BER) e o *throughput*. Esses três parâmetros foram escolhidos porque a potência está relacionada com a interferência que o usuário secundário produz no usuário primário, já os outros dois parâmetros estão relacionados com a *Quality of Service* QoS, que se refere à garantia de largura de banda e a probabilidade de o pacote ser entregue.

Moghal, Khan e Bhatti (2010) também propuseram a utilização de AGs em MC. Assim como em Kumar et al. (2013), os autores consideraram BER e potência de transmissão, adicionalmente, os mesmos também consideraram a frequência e a modulação utilizada pelos rádios na rede RC.

Utilizando o *software* MatLab o algoritmo proposto mostrou-se promissor, pois atingiu a solução ótima desejada.

Apesar da técnica de algoritmo genético parecer ser uma opção, ela é dispendiosa e requer um alto custo computacional. Para uma rede real de rádios cognitivos, implementar um motor cognitivo baseado em AG não seria a melhor escolha, pois os AGs têm tempo elevado para convergência. Dessa forma, o processo de decisão do espectro seria comprometido pois iria demorar um tempo considerável. Isso torna inviável a utilização desta técnica em uma rede de nós reais. Observa-se que a técnica de AG é comumente utilizada em ambientes simulados computacionalmente.

Outra técnica utilizada para o desenvolvimento de um motor cognitivo é o Modelo Oculto de Markov (vide Seção 2.3.3). No trabalho de Ghosh et al. (2009) é dado um exemplo de aplicação de um HMM em sensoriamento do espectro.

Segundo He et al. (2010), a aplicação de um HMM em MC para a formação de rádios cognitivos se justifica pelo fato de que o HMM pode ser utilizado como um processo de observação do motor cognitivo para classificar estímulos recebidos e assim atingir a consciência. Podendo ser utilizado para a previsão e a aprendizagem pode ser obtida através da criação de novos modelos.

No estudo desenvolvido por Akbar e Tranter (2007), foi utilizado a técnica de HMM para modelar e prever a ocupação do espectro de bandas de rádios licenciadas chamado algoritmo *Markov-based channel prediction algorithm (MCPA)* ou algoritmo de previsão do canal baseado em Markov. Com isso, foi criada uma técnica capaz de selecionar dinamicamente diferentes partes do espectro, minimizando assim a interferência com os

UP. Verificou-se também que ao prever a duração do buraco no espectro licenciado, o RC pode utilizar esse espectro de forma mais eficiente. Neste trabalho, foi desenvolvido um algoritmo baseado em RNA que se assemelha com o MCPA. Porém, a RNA considera também o comportamento do espectro local e informações de usuários primários presente na região.

Embora a técnica de HMM seja utilizada, ela é computacionalmente complexa e requer sequências de treinamentos (MEGHANATHAN; REDDY, 2013). Portanto, essa técnica não é aconselhável para uma RRC em um ambiente dinâmico e real.

Além das abordagens apresentadas, existe a técnica que emprega o método AHP. O AHP é um método para tomada de decisões complexas (GE et al., 2009).

Ge et al. (2009), propõem um método automático distribuído para decisão do espectro baseado em AHP (*Automatic Distributed Spectrum Decision - ADSA*). ADSA considera vários parâmetros do espectro e considera também a probabilidade da chegada do usuário primário em uma determinada faixa de espectro. Com o mecanismo de autogeração de pesos, o ADSA, é capaz de reduzir a taxa de *handoff* do espectro. A abordagem utilizada por Ge et al. (2009) é interessante, todavia, ela não considera uma base de dados de usuários primários, a RNA implementada neste trabalho considera essa base.

He et al. (2010), apresentam várias possibilidades de aplicação de RNA em RC. Existem trabalhos relacionados com o sensoriamento do espectro, no qual a RNA foi utilizada para classificar redes baseadas no padrão IEEE 802.11 e também para classificar características de sinais de ciclo estacionários. Outros trabalhos aplicam RNA para adaptação dos parâmetros

do rádio, no qual a RNA determina os parâmetros de rádio utilizando três fatores: o *Bit Error Rate* BER, maximizando o rendimento, e minimizando a potência de transmissão.

Sharma e Bohara (2014), discutem a utilização de RNA aplicada para detecção ou previsão do canal do espectro. Nesse artigo o autor expõe que os usuários secundários podem prever o estado de um canal com base no histórico de detecção. Com isso, a rede pode determinar se o canal está ocioso ou não e prever o horário que o canal estará ocioso. Desse modo, os usuários secundários podem salvar a energia de detecção, eliminando a necessidade de sensoriar o espectro repetidamente. Apesar de Sharma e Bohara (2014) considerarem o histórico de detecção do canal, não são consideradas as faixas dos usuários primários. Além disso, o sensoriamento do espectro deve ser realizado de forma contínua, embora possa sensoriar uma faixa menor do espectro de frequências. O fato de não sensoriar o espectro pode prejudicar o funcionamento da RRC.

Após apresentados os trabalhos relacionados ao protocolo proposto, na seção seguinte, será apresentado o processo metodológico utilizado para avaliar o protocolo de decisão do espectro proposto, o protocolo SIRCo.

4 METODOLOGIA

O problema da coexistência entre redes heterogêneas requer o desenvolvimento de uma arquitetura para RC, bem como um protocolo que utiliza métodos de decisão de espectro para RRC. É importante observar que na literatura existem lacunas com relação à coexistência de redes e protocolos de decisão de espectro para SDR, justificando o interesse deste trabalho.

Devido à escassez de artigos na literatura em que as redes de rádios cognitivos (RRCs) são implementadas em dispositivos reais, optou-se por empregar uma rede real como método de avaliação da solução proposta. Essa escolha se justifica, já que em ambiente real os dados coletados podem ser afetados por: interferências, ruído de diversas fontes (aparelhos eletrônicos ou UPs), atraso de propagação e outras características. Essas perturbações nos dados são complexas para modelagem em um ambiente simulado. Dessa forma, os dados gerados por um simulador não são tão precisos quanto os dados coletados por dispositivos reais. Sendo assim, a escolha dos dispositivos reais levou em consideração a capacidade do rádio. Considerando esse fator, os dispositivos escolhidos foram as *Universal Software Radio Peripheral* USRPs.

As USRPs utilizadas para a implementação da RRC real são as de modelo B200 e B210 ¹. Esses dispositivos têm a capacidade de alterar as frequências dos seus rádios entre a faixa de *70MHz* e *6GHz*. Para a implementação da RRC real, foi incorporado um módulo MAC desenvolvido por Bloessl et al. (2013). Este módulo pode ser considerado como um MAC simples ou genérico, pois não são implementados nenhum esquema de TDMA

¹Informações adicionais disponíveis em: <https://www.ettus.com/content/files/b200-b210_spec_sheet.pdf> - acesso em 02 maio 2016

ou CSMA, além de que, esse módulo não possui descoberta de vizinhos, roteamento de mensagens e não possui mecanismos que garanta a entrega de pacotes (retransmissão de pacotes). Já que o MAC genético não implementa o roteamento de pacotes, optou-se por uma topologia centralizada, como mostra a Figura 10.

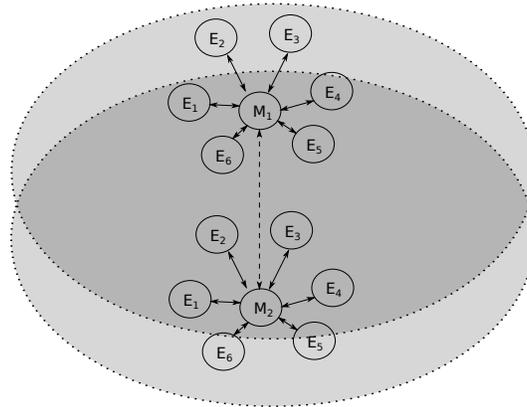


Figura 10 Representação de uma topologia centralizada com dois *clusters* para uma RRC real.

Na Figura 10, observa-se duas RRCs centralizadas em seus respectivos nós centralizadores (nó mestre M_1 e M_2). Os nós E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , E_5 e E_6 representam os nós escravos das duas RRCs, sendo que, cada nó escravo está subordinado a um nó mestre. Apesar da rede ser centralizada, existe um potencial de escalabilidade da rede, já que uma organização em *cluster* é possível, como mostra a Figura 10. Esses *clusters* podem comunicar-se entre si por meio dos nós mestres.

4.1 Módulos de Decisão do Espectro Avaliados

Na Figura 11, é apresentado o processo metodológico aplicado neste trabalho. O retângulo *Aplicação* representa a aplicação desenvolvida neste

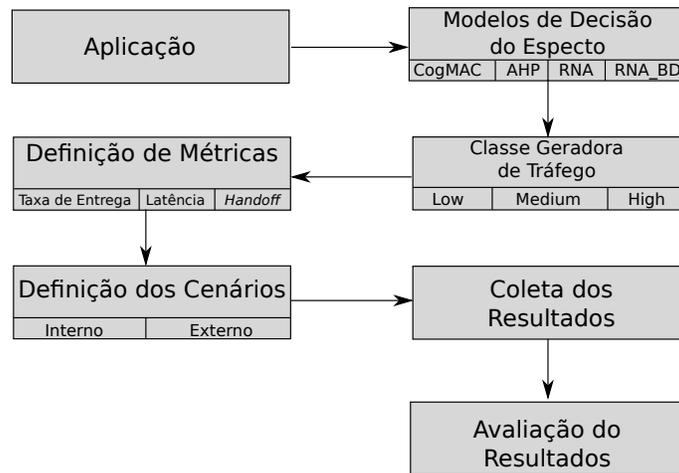


Figura 11 Metodologia de avaliação da solução proposta.

trabalho. Essa aplicação consiste em enviar uma sequência de *bits* aleatória de tamanho fixo, sendo possível obter a métrica de latência.

Neste trabalho, foram consideradas quatro abordagens com foco na decisão do espectro e escolha do melhor canal:

1. Avaliação da força do sinal (RSSI) do canal amostrado, baseado no protocolo CogMAC.
2. Avaliação do canal com base na técnica AHP em que os parâmetros de potência de sinal, tempo em que o canal foi acessado e a presença UP no canal amostrado são considerados.
3. Avaliação do canal utilizando a técnica RNA considerando os dados amostrados e o histórico do comportamento do canal avaliado.
4. Avaliação do canal com base na técnica RNA em que dados amostrados de todos os canais dentro da faixa de $0,8GHz$ a $5,8GHz$ foram con-

siderados. Assim como, foi considerado também o histórico de acesso dos canais e os dados oficiais dos UPs disponibilizado pela ANATEL.

Todas as abordagens consideradas seguem a arquitetura de um RRC proposta por Akyildiz et al. (2008) e desenvolvida neste trabalho. Portanto, todas as abordagens implementam o sensoriamento do espectro, a decisão do espectro, o compartilhamento do espectro e a mobilidade do espectro. Adicionalmente, em todas as abordagens o nó mestre, assim como o nó escravo, obtêm a lista de seus vizinhos.

A abordagem baseada no protocolo CogMAC, considera somente a coleta de RSSI do canal amostrado, para isso são realizadas as seguintes tarefas:

- Coleta do parâmetro de RSSI do canal amostrado;
- Avaliação e escolha do melhor canal considerando somente a força do sinal amostrado.

A segunda abordagem é baseada na técnica AHP, em que a seleção do melhor canal passa a considerar os parâmetros de potência do sinal, UP presente no canal amostrado e o *timestamp* do acesso ao canal amostrado. As tarefas realizadas são:

- Coleta dos parâmetros de avaliação do canal por meio do sensoriamento do espectro;
- Classificação dos canais levando-se em consideração os parâmetros coletados e o método de decisão (AHP).

A terceira abordagem, que emprega a técnica RNA, foi baseada em Bai, Zhou e Xu (2014). A rede neural foi treinada previamente considerando

o histórico do comportamento dos canais entre a faixa de $0,8GHz$ a $6GHz$. Para a seleção do canal, foi considerado o nível de RSSI do canal amostrado, assim como o histórico de acesso dos UPs na faixa de espectro utilizada no treinamento:

- Coleta dos parâmetros de avaliação do canal por meio do sensoria-
mento do espectro;
- Classificação dos canais considerando o nível atual de RSSI e os dados
de treinamento da RNA.

A quarta abordagem é uma extensão da terceira empregando tam-
bém a técnica de RNA para a seleção do melhor canal. O treinamento
da RNA considerou o histórico de acesso ao canal dos UPs da região, as-
sim como os dados referentes aos UPs fornecidos pela ANATEL. As tarefas
realizadas são:

- Coleta dos parâmetros de avaliação do canal por meio do sensoria-
mento do espectro;
- Classificação dos canais considerando o nível atual de RSSI, a Base de
Dados da ANATEL e os dados de treinamento da RNA_BD.

4.2 Classe Geradora de Tráfego

Neste trabalho, também foi desenvolvido uma classe geradora de
tráfego de mensagens. Essa classe foi implementada a fim de avaliar qual a
influência do tipo de tráfego no comportamento da solução proposta, per-
mitindo assim, avaliar a taxa de entrega de pacotes para diferentes tipos de
aplicação.

A classe geradora de tráfego segue um modelo predefinido, em que os pacotes são enviados de acordo com cada modelo. Todos os modelos de tráfegos desenvolvidos são constantes (*Constant Bit Rate* CBR), ou seja, envio de pacotes de tamanho fixo a uma taxa constante entre o envio de dois pacotes. Apesar do tráfego de pacotes ser constante, foi desenvolvido três tipos de tráfegos:

- Tráfego baixo (*Low*): as mensagens são enviadas em intervalos de tempo de *50ms*;
- Tráfego médio (*Medium*): as mensagens são enviadas em intervalos de tempo de *12ms*;
- Tráfego alto (*High*): as mensagens são enviadas em intervalos de tempo de *8ms*.

4.3 Métricas de Avaliação

Para a avaliação da solução proposta, foram determinadas três métricas comumente difundidas para avaliação de uma rede sem fio: Taxa de Entrega, Latência e *Handoff*.

1. *Taxa de Entrega*: métrica escolhida a fim de mensurar à quantidade de pacotes recebidas no nó destino em relação a quantidade de pacotes enviados pelo nó origem.
2. *Latência*: métrica que permite quantificar o tempo gasto para que uma sequência de *bits* seja transmitida entre a origem e o destino. Essa métrica foi escolhida a fim de constatar o tempo real que uma mensagem gasta para ser transmitida.

3. *Handoff*: Fenômeno que ocorre quando dois dispositivos alteram a frequência de operação por uma outra frequência sem alterar a tecnologia (modulação, protocolos, MAC, entre outros...) empregada para a transmissão de mensagens. Foi utilizada essa métrica para determinar quantas vezes cada abordagem mudou de canal.

4.4 Definição dos Cenários de Avaliação

Para a avaliação das métricas propostas, foram definidos dois ambientes: Ambiente Interno (AI) e Ambiente Externo (AE). No AI, os nós são dispostos a uma distância inferior a 5 metros, com isso, o ambiente se torna ruidoso, esse ambiente tem por objetivo verificar RRCs em espaços com muito ruído. Já no AE, os nós são dispostos a uma distância superior a 15 metros e inferior a 45 metros, esse ambiente foi idealizado para verificar a conectividade da rede considerando uma distância maior e as intempéries inerentes a ambientes externos.

Neste trabalho, foram definidos quatro cenários para a RRC (Tabela 2).

Tabela 2 Composição dos Cenários de Teste

	Composição
<i>Ce1</i>	1 nó mestre e 1 nó escravo
<i>Ce2</i>	1 nó mestre e 3 nós escravos
<i>Ce3</i>	1 nó mestre e 5 nós escravos
<i>Ce4</i>	1 nó mestre, 3 nós escravos e 1 UP que opera em cinco frequências

O cenário *Ce1* foi elaborado com o intuito de verificar a conectividade da rede e também verificar a implementação da solução proposta. Já no *Ce2*, os nós foram dispostos de forma ortogonal. Esse cenário tem como objetivo verificar as colisões entre os pacotes enviados. No cenário *Ce3*, os nós foram dispostos em pares, sendo que o nó mestre pertencia ao par central, esse

cenário foi desenvolvido para verificar a escalabilidade dos nós escravos na rede.

Na *Ce4*, os quatro nós (mestre e escravos) foram dispostos em formação de **X**, sendo que o nó que representa o UP foi colocado no meio do cenário. Essa formação tem o intuito de verificar o comportamento dos métodos de decisão na presença de um UP que altere a sua frequência em um período de 30 segundos. É importante observar que todos os cenários são constituídos de nós reais, portanto, são sujeitos a interferências de UP reais que estão presentes no ambiente.

Para cada experimento, foram realizadas três repetições para os quatro cenários, em cada repetição a RRC completa 10 ciclos. Os dados coletados foram: total de pacotes enviados por ciclo, total de pacotes recebidos por ciclo, tempo de ida e volta de uma mensagem entre origem e destino (*Round Trip Time* - RTT) e melhor frequência escolhida pelo método de decisão em todos os ciclos.

Para os experimentos em ambiente interno, foram considerados os cenários *Ce1*, *Ce2*, *Ce3* e *Ce4* sendo que, nos cenários *Ce2* e *Ce3*, foram consideradas duas estratégias de transmissão de dados. Já para os experimentos em ambiente externo, foram considerados os cenários *Ce1*, *Ce2* e *Ce3*. Todos os experimentos em AE consideraram somente uma estratégia de transmissão de dados.

Na avaliação das métricas taxa de entrega, latência medida em RTT e *handoff*, foi considerado um índice de confiança de 95%.

A seguir, são apresentados o desenvolvimento da solução proposta, os resultados e as discussões acerca dos dados coletados.

5 SENSORIAMENTO INTELIGENTE PARA RÁDIOS COGNITIVOS

Nesta seção, é apresentado todos os elementos que compõem a arquitetura proposta, assim como o protocolo MAC SIRCo (Sensoriamento Inteligente para Rádios Cognitivos).

5.1 Arquitetura SIRCo

A arquitetura proposta é apresentada na Figura 12. A camada de aplicação é responsável por gerar mensagens de dados de tamanho fixo constituídas de *bits* aleatórios.

A *classe geradora de tráfego* é responsável por gerar os modelos de tráfegos utilizados para as trocas de mensagens. A funcionalidade de roteamento não foi implementada, mas pode ser adicionada sem grandes modificações na arquitetura.

Na camada MAC, tem-se os modelos de decisão do espectro baseados no CogMAC, na técnica AHP e na técnica RNA. Na camada física, observa-se o sensoriamento do espectro realizado pelo dispositivo real, assim como o controle de potência utilizado na fase de descoberta de vizinhos. Observa-se também a modulação empregada para a transmissão dos pacotes. Ainda na camada física, tem-se o módulo denominado *Handoff*, responsável por efetuar as trocas de frequências do nó real além de reconfigurá-lo para o Canal de Controle Comum (CCC).

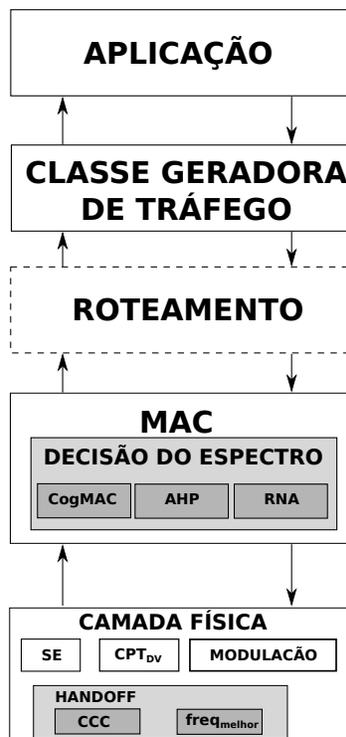


Figura 12 Arquitetura do protocolo SIRCo disposta em camadas.

5.2 O protocolo SIRCo

O SIRCo pode ser classificado como um protocolo que utiliza o compartilhamento do espectro de forma centralizada, alocação cooperativa do espectro e acesso ao espectro por subjacência (vide Subseção 2.1.3).

O compartilhamento do espectro centralizado é justificado, pois o SIRCo é gerenciado por uma entidade central denominada nó mestre. Além disso, o nó mestre concentra todas as informações da RRC, caracterizando alocação cooperativa do espectro.

O SIRCo possui um módulo de decisão do espectro que utiliza uma RNA capaz de identificar as faixas que estão sendo utilizadas pelos UPs e

informar aos nós da RRC uma faixa livre de forma a atender aos requisitos de *QoS* (largura de banda), essa capacidade é denominada de subjacência do espectro. Adicionalmente, o protocolo SIRCo utiliza o compartilhamento do espectro intrarrede, porém se for empregado mais nós mestres o compartilhamento empregado é o inter-rede.

O protocolo considera dois tipos de nós, o nó mestre e nó escravo. O nó mestre é responsável por centralizar todas as informações referentes ao sensoriamento do espectro e tem a capacidade cognitiva de escolher qual é o canal mais adequado de acordo com as requisições da aplicação, só existe um representante deste tipo de nó na rede (único *cluster*). Já o nó escravo é capaz de realizar o sensoriamento do espectro e de comunicar ao nó mestre os dados referentes a esse sensoriamento.

O protocolo SIRCo atua diretamente nas fases de Sensoriamento do Espectro (SE) e Decisão do Espectro (DE). A fase SE é executada pelos nós escravos que coletam informações do espectro. Já a fase DE é executada pelo nó mestre que centraliza as informações dos nós escravos e alimenta o módulo cognitivo capaz de decidir qual é a melhor faixa de espectro para determinada aplicação (Vide Seção 2.1). Com isso, o SIRCo considera os buracos existente no espectro para otimizar, de forma inteligente, a utilização desse espectro. O protocolo considera também uma base de dados local e uma base de dados de UP na região de Lavras/MG.

Utilizando técnicas de otimização baseadas em RNA (vide Seção 2.3), o SIRCo é capaz de prover as funcionalidades básicas para que os usuários secundários (US) possam coexistir com os UP.

5.2.1 Visão Geral

O diagrama de funcionamento do protocolo SIRCo é apresentado na Figura 13. Nela observam-se três módulos: o Sensoriamento do Espectro SE (executado no nó escravo), que é responsável pelo sensoriamento do espectro como um todo; o módulo Decisão do Espectro DE (executado no nó mestre), que é responsável pela decisão do espectro e o módulo de T_r einamento que é utilizado para o treinamento da RNA.

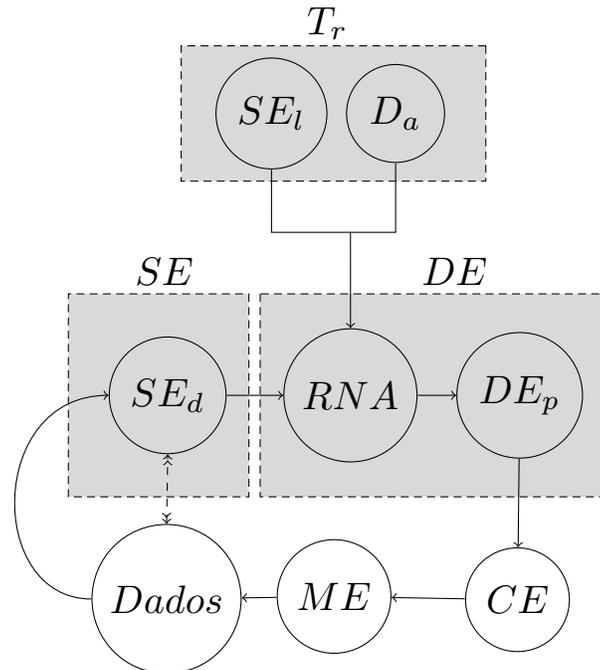


Figura 13 Visão Geral das funcionalidades do protocolo SIRCo.

O módulo T_r é utilizado para o treinamento da RNA. Esse módulo é responsável por prover os pesos das arestas para a RNA durante a fase de treinamento, suas entradas consistem no histórico de acesso local do

UP (SE_l) e na base de dados dos UPs em uma determinada região, dados disponibilizados pela ANATEL (D_a).

No módulo SE , é realizado o Sensoriamento do Espectro Dinâmico (SE_d). O SE_d representa o sensoriamento do espectro realizado pelo nó escravo. Esse módulo também é responsável pelo sensoriamento de uma faixa restrita do espectro após o nó mestre realizar a decisão do espectro. Este refinamento do sensoriamento do espectro em malha fechada é necessário para garantir que não existam UPs na faixa em que a transmissão dos dados irá ocorrer.

O resultado do sensoriamento realizado pelo módulo SE irá alimentar o módulo RNA , que por sua vez classifica todos os dados para que o módulo DE_p possa determinar qual frequência apresenta um buraco no espectro em que o US poderá utilizar.

O módulo DE é responsável por selecionar a melhor faixa do espectro. A seleção do melhor canal é realizada pelo módulo RNA . Já o elemento CE (Compartilhamento do Espectro) é responsável por comunicar aos nós a decisão tomada pelo módulo DE . Depois de efetuar o compartilhamento do espectro o nó irá reconfigurar os seus parâmetros de rádio. Essa fase de reconfiguração de rádio é realizada no ME (*Mobilidade do Espectro*).

Após o nó configurar os parâmetros do rádio, o mesmo realiza a transmissão de pacotes de dados. Essa transmissão é representada pelo módulo $Dados$. Observa-se na Figura 13, que o módulo $Dados$ comunica com o módulo SE_d , garantindo que as transmissões de pacotes não afetem os UPs.

5.2.2 Tipos de Mensagens

O protocolo proposto possui vários tipos de mensagens de controle e de dados. O fluxo das mensagens entre três nós (um nó mestre (M) e dois nós escravos (E1 e E2)) é apresentado na Figura 14.

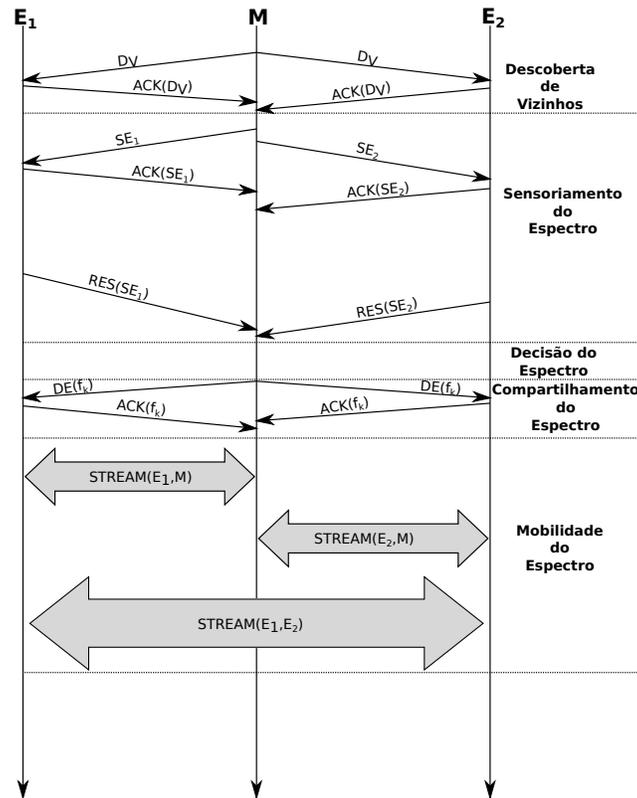


Figura 14 Fluxo de mensagens entre três nós.

O fluxo de mensagem sempre se inicia a partir do nó mestre com uma solicitação de descoberta de vizinhos (DV) em *broadcast*. Os nós que receberam essa mensagem irão responder com um *Acknowledgement* - ACK (ACK(DV)), com isso a fase de *Descoberta de Vizinhos* é concluída. Após a fase DV ser finalizada, o nó mestre envia mensagens de solicitação de

sensoriamento de espectro (SE_n) para todos os vizinhos identificados na fase DV, aguarda as confirmações de SE_n e entra em modo *idle*. Caso o nó mestre não receba a mensagem de confirmação $ACK(SE_n)$, o mesmo irá retransmitir a mensagem SE_n por um período de tempo, caso não tenha sucesso em obter a confirmação $ACK(SE_n)$ esse nó vizinho é considerado desconectado.

Com o recebimento da mensagem SE_n , os nós escravos E1 e E2 executam o sensoriamento. Após a execução, são enviadas, ao nó mestre, todas as informações coletadas do espectro a partir dos nós E1 e E2. Com isso a fase de *Sensoriamento do Espectro* é finalizada.

No momento em que o nó mestre recebe os dados de E1 e E2, enviados no CCC (6GHz), é iniciado o módulo de decisão do espectro. Esse módulo é responsável por escolher a melhor frequência da faixa do espectro considerando as informações recebidas dos nós E1 e E2, o histórico de comportamento do espectro local e a base de dados da ANATEL. Após a escolha da melhor frequência, a fase de *Decisão do Espectro* é finalizada. O nó mestre deve informar aos seus vizinhos a melhor frequência escolhida. Esse fato ocorre na fase de *Compartilhamento do Espectro* como pode ser observado na Figura 14.

Na fase de *Mobilidade do Espectro*, os nós pertencentes a RRC podem enviar os seus dados para os nós destinos.

Os diferentes formatos de mensagens para a interação entre o nó mestre e os nós escravos são apresentados na Tabela 3.

As mensagens $F0$ são mensagens enviadas pelo nó mestre para reconhecer os seus vizinhos imediatos. Como resposta a essa mensagem, os nós escravos respondem com a mensagem $F5$. Nela é enviado o ID do nó escravo com isso, o nó mestre consegue montar uma lista de vizinhos.

Tabela 3 Formatos das Mensagens

	Formato	Tamanho total (bytes)
<i>F0</i>	<0:0>	9 bytes
<i>F1</i>	<ID_DESTINO:TIPO_MSG:DADO>	11 à 58 bytes ou 90 bytes
<i>F2</i>	<K:ID_ORIGEM:PACOTES_TOTAL>	12 bytes
<i>F3</i>	<A:ID_DESTINO:PROX_PACOTE>	11 à 13 bytes
<i>F4</i>	<G:ID_ORIGEM:DADO_SENSE>	12 à 58 bytes
<i>F5</i>	<N:ID_ORIGEM>	9 bytes

As mensagens *F1* são utilizadas pelo nó mestre para se comunicar com os nós escravos ou entre os nós escravos. Essa mensagem pode ser utilizada na requisição de um sensoriamento, para a comunicação do compartilhamento do espectro ou para o envio de dados no ciclo de transmissão de dados, mensagens do tipo 2, 3 ou 4 da Tabela 4. Abaixo, tem-se o exemplo da utilização de *F1* como requisição de sensoriamento.

EX1 - <1:2:0,8:1,2>

Tabela 4 Tipos de Mensagens <TIPO_MSG> de T1

Tipo	Descrição
2	Requisição de sensoriamento do espectro
3	Comunicação de novo canal (compartilhamento do espectro)
4	Dados
5	Confirmação da mensagem do tipo 4

No EX1 tem-se o exemplo de uma requisição de sensoriamento. Esta requisição é destinada ao nó escravo com ID = 1. O nó escravo identifica a mensagem como sendo de sensoriamento por causa do TIPO_MSG = 2. Com isso, o nó compreende que a parcela de informação da mensagem <DADO> é o intervalo à ser sensoriado.

As mensagens *F2* e *F3* são utilizadas para enviar os ACKs. A *F2* é enviada de um nó escravo e informa a quantidade de pacote que o nó mestre terá que receber. Já a mensagem *F3* é enviada pelo nó mestre, ela contém

o número do próximo pacote que será enviado pelo nó escravo. Nas mensagens do tipo *F4*, são enviadas as informações obtidas pelo sensoriamento do espectro.

A seguir, são apresentadas as arquiteturas do nó mestre e do nó escravo.

5.2.3 Arquitetura do Nó Mestre

Na Figura 15, são apresentadas as ações empregadas pelo nó mestre. A fase inicial é a descoberta de vizinhos (DV) necessária para a formação da topologia de rede. As outras fases consideram a arquitetura de RRC proposta por Akyildiz et al. (2008) em que o retângulo SE representa a fase de Sensoriamento do Espectro, o retângulo DE representa a fase de Decisão do Espectro, o retângulo CE representa a fase de Compartilhamento do Espectro e o retângulo ME representa a fase de Mobilidade do Espectro. As setas representam o sentido de direção do fluxo.

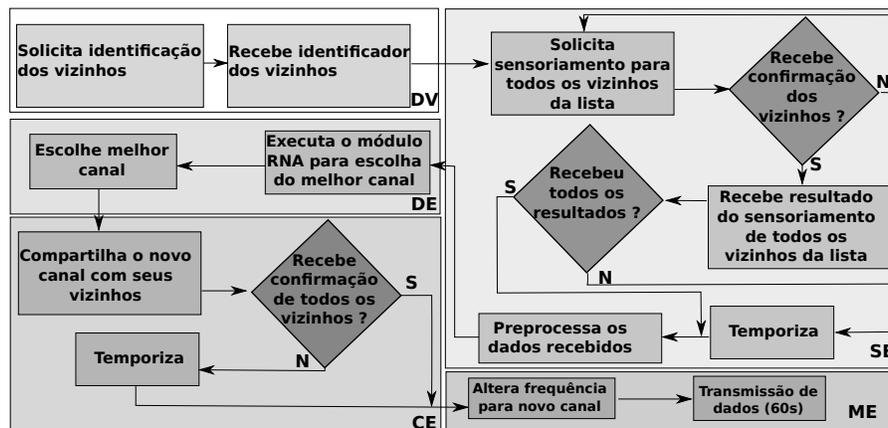


Figura 15 Fluxo de ações do nó mestre em um ciclo completo.

A arquitetura do nó mestre, apresentada na Figura 15, foi desenvolvida para as USRPs e implementada no *framework* GNU-Radio. Dessa forma, as ações do nó mestre são mapeadas para o GNU-Radio, conforme demonstrado na Figura 16, para os três modelos de decisão (MDE-RNA, MDE-AHP e MDE-COG). A implementação do MDE-COG e do MDE-AHP pode ser encontrada em Correia et al. (2012).

O bloco **GENERIC MAC** (4) foi proposto por Bloessl et al. (2013) que é uma simplificação do padrão IEEE 802.15.4. Todos os outros blocos foram implementados em linguagem de programação C++/Python. Na Figura 16, as USRPs são conectadas à plataforma GNU-Radio pelos blocos **UHD:USRP SINK** (5) e **UHD:USRP SOURCE** (6).

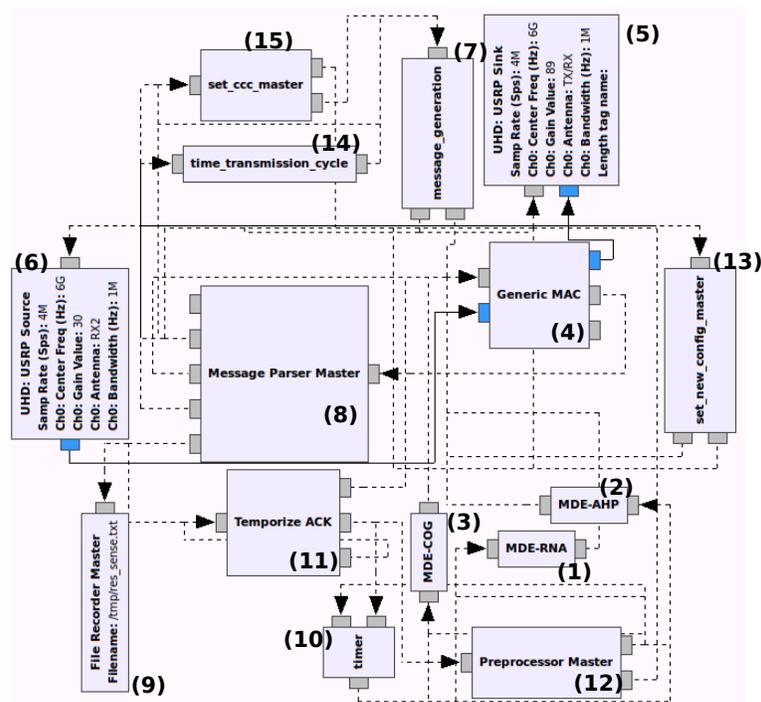


Figura 16 Implementação do nó mestre no GNU-Radio.

O protocolo SIRCo inicia seu processo de comunicação na fase descoberta de vizinhos (bloco `message_generation` (7) da Figura 16), com o nó mestre solicitando o identificador (ID) de todos os seus vizinhos imediatos, essa mensagem é enviada tanto no canal de controle comum (CCC), configurado em $6GHz$, quanto no canal corrente. Logo após, o nó mestre constrói uma lista de vizinhos com todos os IDs recebidos. O bloco `Message Parser Master` (8) é responsável por receber todas as mensagens no nó mestre. o processo de descoberta de vizinhos pode ser observado no retângulo (DV) da Figura 15.

Com a lista dos vizinhos concluída, o nó mestre solicita sensoria-mento para todos os vizinhos presentes nesta lista. Se o nó mestre não receber confirmação de sensoriamento do nó escravo ele reenvia a solicita-ção, até um tempo limite (retângulo (SE) da Figura 15). Após o envio da solicitação de sensoriamento, o nó mestre fica aguardando receber os resultados dos mesmos.

Foram considerados dois tipos de sensoriamento, o sensoriamento completo e o sensoriamento restrito, menos abrangente. Os dois tipos de sensoriamento serão abordados na Seção 5.2.4. Assim que o nó mestre co-mença a receber os dados do sensoriamento (`File Recorder Master` (9)), ele inicia um temporizador (`Timer` (10)), com isso, se um nó escravo perder a co-nexão, o nó mestre não irá esperar os resultados para sempre. Com todos os resultados recebidos ou com o temporizador esgotado (`Temporize ACK`(11)), ocorre o pré-processamento dos dados (`Preprocessor Master` (12)) e então a fase de DE é inicializada. O pré-processamento é realizado para organizar todos os dados de forma que a RNA reconhecesse esses dados como dados válidos de entrada.

Na fase DE, o MDE *RNA* (MDE-RNA (1)) é inicializado. A Figura 17 mostra o detalhamento do módulo *RNA*.

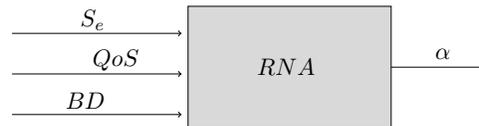


Figura 17 Motor cognitivo baseado em *RNA*.

Na Figura 17, são apresentadas as entradas S_e , QoS e BD para o módulo de classificação dos buracos do espectro *RNA*. A entrada S_e corresponde às informações oriundas do sensoriamento do espectro, classificando uma chave (frequência, potência, tempo de acesso) por vez. A entrada QoS representa os requisitos da aplicação, esses requisitos podem variar de acordo com a aplicação desejada. Na aplicação escolhida para este trabalho, o QoS foi a garantia de maior largura de banda, com a menor probabilidade de presença de UPs. A entrada BD representa a base de dados disponibilizada pela ANATEL, nessa base de dados há o registro de todos os usuários primários da região onde foram realizados os experimentos. Esses registros consistem em qual frequência um determinado UP está licenciado. Já na saída α , tem-se a classificação das frequências de entrada. Após a classificação de todas as frequências presentes em S_e , o módulo de decisão escolhe a melhor frequência baseado nos resultados obtidos depois da execução da *RNA*. Para maiores detalhes sobre o treinamento do MDE-RNA, vide APÊNDICE A.

Após o módulo *RNA* executar, o nó mestre escolhe o melhor canal (retângulo (DE) Figura 15) e inicia a fase de CE, comunicando para os seus vizinhos a nova frequência escolhida. Quando todos os nós vizinhos enviarem uma mensagem de confirmação de recebimento da nova frequência,

ou o temporizador esgotar tem-se início a fase ME (retângulo (ME) Figura 15).

Durante a fase ME, o nó mestre reconfigura o seu rádio para a nova frequência (`set_new_config_master` (13)), com isso têm início a janela de transmissão de dados (`time_transmission_cycle` (14)). A janela de Tx tem duração de 60 segundos, após esse intervalo, o processo se reinicia.

Quando o nó mestre fica ocioso, ou não recebe informações de nenhum nó vizinho, o bloco `set_ccc_master` (15) reconfigura o seu rádio para a frequência comum de *6GHz*.

O algoritmo que representa as funcionalidades do nó mestre encontra-se no APÊNDICE B.

5.2.4 Arquitetura do Nó Escravo

A Figura 18 apresenta a arquitetura do nó escravo desenvolvida para as USRPs e implementada no *framework* GNU-Radio. A implementação do nó escravo correspondente, em diagrama de fluxo do GNU-Radio, é mostrada na Figura 19. O algoritmo que representa as funcionalidades do nó escravo encontra-se no APÊNDICE B.

As ações realizadas pelo nó escravo são divididas em duas fases: a primeira fase compreende o processo de sensoriar o espectro e comunicar ao nó mestre os resultados dos mesmos. Na segunda fase, o nó escravo realiza as ações pertinentes à ME.

O processo se inicia com o nó escravo recebendo uma solicitação de descoberta de vizinhos, esta solicitação é enviada pelo nó mestre (vide Figura 15), com isso, o nó escravo envia uma mensagem (`Message Parser` (1)) contendo o número identificador do nó (ID). Logo a seguir, o nó mestre

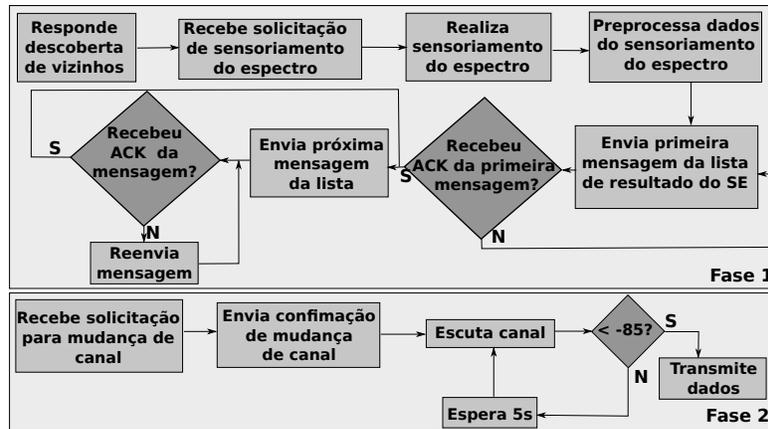


Figura 18 Fluxo de ações do nó escravo em um ciclo completo.

envia uma solicitação de sensoriamento do espectro. A mensagem de sensoriamento é então recebida pelo nó destino para que o sensoriamento do espectro tenha início (**Start Sense** (2)).

O sensoriamento do espectro funciona da seguinte forma: O nó mestre envia uma mensagem requisitando o sensoriamento do espectro, mensagem do formato F1 e tipo 2. O pacote contendo a mensagem é capturada pela USRP por meio do bloco UHD: **USRP Source**. O pacote então é enviado para a camada de aplicação pelo bloco **Generic MAC**. Feito isso, o pacote é enviado para o bloco **Message Parser** (1). Esse bloco é responsável pela decodificação do pacote. Se a mensagem contida no pacote for do tipo sensoriamento do espectro ela é enviada para o bloco **Start Sense** (2).

O sensoriamento do espectro pode ser de dois tipos. O primeiro tipo é o sensoriamento completo que compreende as faixas do espectro de frequência $0,8GHz$ a $6GHz$. Já o segundo tipo é um sensoriamento restrito que cobre um intervalo de $Freq - 0,3GHz < Freq < Freq + 0,3GHz$, sendo que $Freq$ representa a frequência atual do dispositivo. O segundo sensoriamento

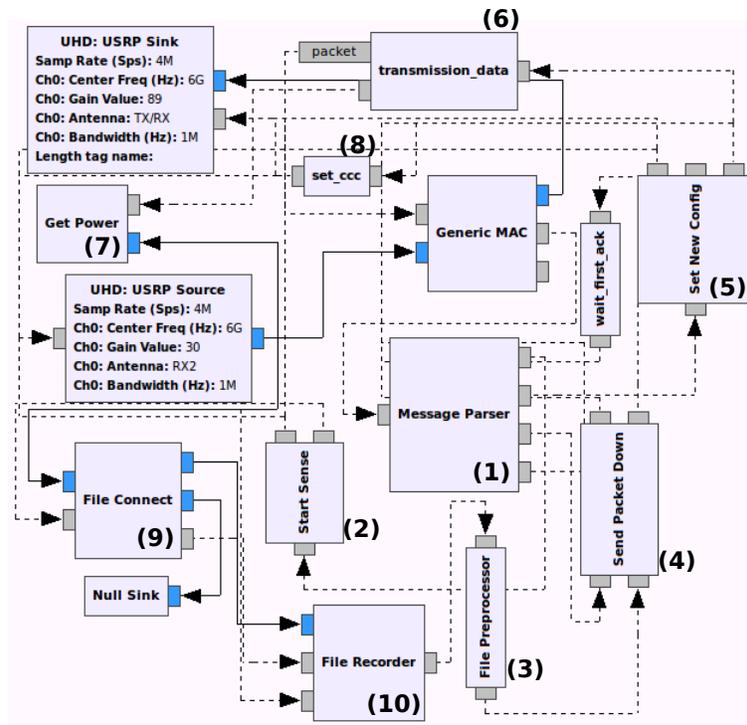


Figura 19 Implementação do nó escravo no GNU-Radio.

foi idealizado para aumentar a performance do SIRCo já que a fase de sensoriamento do espectro é a mais demorada.

O bloco **Start Sense** inicia o sensoriamento do espectro, coletando o RSSI do canal amostrado. Por exemplo: se o nó mestre requisitou o sensoriamento da faixa do espectro que compreende de $0,8GHz$ à $1,2GHz$, o bloco **Start Sense** irá modificar a frequência da placa USRP por meio do bloco **UHD: USRP Source**. Essa modificação é realizada por meio de uma mensagem que a placa reconhece como sendo a nova frequência de trabalho. As frequências são incrementadas em intervalos de $20MHz$. Foi definido esse intervalo, pois considerando um intervalo pequeno ($< 20MHz$), a fase de sensoriamento do espectro iria ficar demorada além de gerar um fluxo alto de

informação. Já se considerar intervalos maiores que $20MHz$, o sensoriamento do espectro não seria eficiente, além de gerar poucas informações, as mesmas não seriam precisas.

Assim que a placa é configurada para a nova frequência, a mesma começa a coletar as informações do espectro de forma imediata e contínua. A informação gerada é encaminhada para o bloco `File Connect` (9), assim como também é enviado ao bloco `File Connect` (9) uma *tag* de controle informando que o sensoriamento do espectro está ativo. Com essas duas informações, o bloco `File Connect` (9) é capaz de direcionar o fluxo de dados originado pela USRP para o bloco `File Recorder` (10) ou para o bloco `Null Sink`. Caso a *tag* do sensoriamento estiver ativa, o fluxo é enviado para o bloco `File Recorder` (10), caso contrário para o bloco `Null Sink`.

No bloco `File Recorder`, as informações de interesse são filtradas e armazenadas em um arquivo de texto. Quando o sensoriamento chega ao fim, o bloco `Start Sense` (2) comunica ao bloco `File Recorder` (10).

Após essa etapa, um arquivo de texto com todas as frequências do intervalo enviado pelo nó mestre e seus valores de potência em *dBm* é construído. O Código 1 exemplifica um arquivo gerado pela USRP.

```

1 |
2 | 800000000: -111
3 | 800000000: -112
4 | 800000000: -111
5 | 820000000: -112
6 | 820000000: -116
7 | 820000000: -111
8 | 840000000: -114
9 | 840000000: -118
10 | 840000000: -116
11 | .
12 | .
13 | .
14 | 1100000000: -116

```

Código 1 Exemplo de arquivo sem processamento gerado pela USRP

Com o sensoriamento do espectro realizado, o nó escravo pré-processa os dados (**File Preprocessor** (3)) obtidos no sensoriamento do espectro. Essa etapa é realizada para minimizar o número de mensagens que serão enviadas ao nó mestre. O alto número de informações é gerado pela placa USRP devido à coleta de várias amostras de uma mesma faixa de frequência. O código 2 apresenta um exemplo dos dados já pré-processados e prontos para serem encaminhados ao bloco **Send Packet Down** (4). A primeira linha do código 2 representa o primeiro pacote a ser enviado. O seu *payload* é constituído do número do pacote e do tamanho total da mensagem. Nas demais linhas, os pacotes são constituídos pelo número do pacote e pelos resultados do sensoriamento do espectro.

```

1 | 1:162;
2 | 2:2.4:-94;0.8:-111;0.82:-111;0.84:-114;0.86:-11
3 | 3:3;0.88:-103;0.9:-114;0.92:-114;0.94:-114;0.96
4 | 4:-103;0.98:-116;1:-117;1.02:-116;1.04:-116;1.
5 | 5:06:-116;1.08:-116;1.1:-116;
```

Código 2 Exemplo de arquivo já processado e organizado em pacotes

Após o nó escravo enviar as suas informações (**Send Packet Down** (4)) referentes ao sensoriamento, o nó mestre é capaz de organizar as informações recebidas dos nós escravos em uma lista que é utilizada na fase de decisão do espectro. Depois que são enviadas todas as mensagens, o nó escravo fica aguardando o início da fase 2.

A fase 2 se inicia com o nó mestre enviando uma solicitação para migração de canal. Após receber a solicitação de migração de canal (**Message Parser** (1)), o nó escravo envia uma confirmação de migração de canal, para, em seguida, migrar para o novo canal (**Set New Config** (5)). Com isso, o nó escravo está apto para começar a transmitir os dados da aplicação (**transmission_data** (6)), a transmissão dos dados ocorre dentro de um intervalo de 60 segundos, este intervalo pode ser configurado de acordo com

a aplicação. Antes de transmitir os dados, o nó escravo faz uma leitura baseada em RSSI no novo canal (**Get Power (7)**) para que seja garantido que nenhum usuário primário esteja no novo canal. A transmissão ocorre se a leitura retornar um valor inferior a $-85dBm$, esse valor pode ser configurado de acordo com o nível de interferência que o UP suporta ².

Quando um nó escravo perde a comunicação com o nó mestre, o bloco **set_ccc (8)** age como mecanismo de resiliência da rede, reconfigurando o canal do nó escravo para um canal de controle comum (CCC), especificado para a frequência $6GHz$.

5.2.5 AHP e CogMAC

O modelo de decisão baseado no CogMAC seleciona o melhor canal somente comparando o RSSI. Por ser uma abordagem menos complexa do que as abordagens que utilizam as técnicas de RNA e AHP, o *QoS* da aplicação busca um canal com o menor RSSI possível, conseqüentemente, esse canal não estaria em uso pelo UP. Porém, não foi possível desenvolver um método de previsão do espectro com essa abordagem. O detalhamento desse modelo é apresentado na Figura 20.

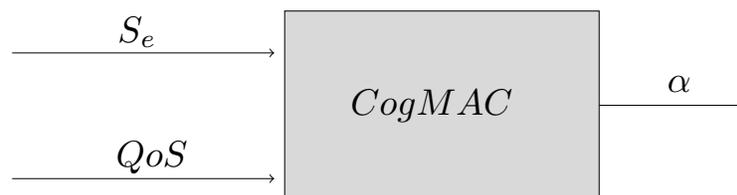


Figura 20 Motor cognitivo do protocolo *CogMAC*.

²No Brasil existe a resolução N^o506 da ANATEL que define um limiar de interferência no UP de $-62dBm$ para a potência irradiada de saída inferior a $200mW$ e limiar de $-64dBm$ para potência irradiada de saída entre $200mW$ e $1W$ para as frequências de $5.2GHz$ e $5.4GHz$, respectivamente.

Na Figura 20, observa-se as entradas S_e e QoS e a saída α . A entrada S_e representa o sensoriamento do espectro coletado de forma dinâmica, o QoS representa os requisitos da aplicação, que neste caso é o menor ruído base entre todas as frequências. Já a saída α representa a frequência selecionada, entre todas as frequências presentes em S_e , com o menor RSSI.

O modelo de decisão do espectro baseado em *AHP* tem como objetivo garantir a largura de banda e prever quando os UPs estarão em uma determinada frequência. O objetivo dessa abordagem é o mesmo que a abordagem que utiliza *RNA*. Por ser uma abordagem complexa, foi possível implementar um modelo de previsão do espectro. Na Figura 21, é apresentado o detalhamento do modelo baseado em *AHP*.



Figura 21 Motor cognitivo do protocolo *AHP*.

Na Figura 21, observa-se as entradas S_e , QoS e $Pesos$ e a saída α . A entrada S_e , assim como nas outras abordagens, representa o sensoriamento do espectro local. A entrada QoS representa os requisitos da aplicação. Para esses requisitos, foram consideradas a largura de banda e a probabilidade de chegar um UP na faixa escolhida. Igualmente ao método de decisão *RNA*, o método *AHP* seleciona o canal com maior largura de banda com menor probabilidade de chegada de um UP.

A entrada $Pesos$ representa os pesos que foram definidos previamente. Foram definidos três parâmetros como peso: RSSI, tempo de co-

leta do RSSI e frequência licenciada. As importâncias dos pesos de cada parâmetro, seguindo a lógica de Saaty (2001), foram definidos como:

1. O parâmetro *Frequência Licenciada* é três vezes mais importante que o parâmetro *RSSI* e quatro vezes mais importante que o parâmetro *Tempo de Acesso do UP*.
2. O parâmetro *RSSI* é duas vezes mais importante que o parâmetro *Tempo de Acesso do UP* e $1/3$ vezes a importância de *Frequência Licenciada*.
3. O parâmetro *Tempo de coleta do RSSI* é $1/4$ da importância do parâmetro *Frequência Licenciada* e $1/2$ vezes a importância do parâmetro *RSSI*.

Na Tabela 5, é apresentada a importância de cada parâmetro, ao final de cada coluna é apresentada a soma de seus valores que serão utilizados para definir os pesos finais do método AHP.

Tabela 5 Critérios de julgamento utilizados no método AHP

	Frequência Licenciada	RSSI	Tempo de coleta do RSSI
Frequência Licenciada	1	3	4
RSSI	0,333333	1	2
Tempo de coleta do RSSI	0,25	0,5	1
Soma	1,583333	4,5	7

Após realizar a soma dos valores de cada coluna, deve-se dividir o valor total encontrado na coluna pelos elementos dessa coluna. A Tabela 6 apresenta as médias obtidas desse processo, essas médias foram utilizadas como peso para os parâmetros do AHP.

Tabela 6 Média dos pesos dos critérios de julgamento utilizado no método AHP

	Frequência Licenciada	RSSI	Tempo de coleta do RSSI
Frequência Licenciada	0,63	0,666666	0,57
RSSI	0,21	0,222222	0,28
Tempo de coleta do RSSI	0,15	0,111111	0,14
Média	0,62222	0,24	0,13333

Após a definição dos pesos, o método de decisão baseado em *AHP* é capaz de classificar o melhor canal.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos empregando-se o processo metodológico definido para este trabalho. Primeiramente é apresentado o levantamento para a criação da base de dados que foi utilizada para o treinamento da RNA. Posteriormente, são apresentados os resultados obtidos por meio da execução dos cenários propostos.

6.1 Levantamento de Dados Local

O local escolhido para realizar o mapeamento do espectro foi o laboratório e a área externa do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Lavras.

Para o mapeamento do espectro, foi utilizado uma placa B100 da Ettus Research. Nessa placa, foi utilizado um código desenvolvido em Python que captura os níveis de ruído em cada frequência, esse código está disponível para acesso ³ e foi modificado para gerar as informações desejadas. O espectro mapeado compreende a partir da frequência $800MHz$ a $5.9GHz$. Esse mapeamento consistiu em monitorar o espectro durante sete dias, a fim de verificar quais faixas do espectro estavam em uso intenso e quais estavam ociosas.

Juntamente com o mapeamento do espectro local, foi levantado informações oficiais da Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL. Por meio da ANATEL, foi possível obter de quem são e onde estão localizados os usuários primários na região da cidade de Lavras/MG. Com isso,

³Disponível em: https://github.com/gnuradio/gnuradio/blob/master/gr-uhd/examples/python/usrp_spectrum_sense.py

foi possível cruzar as duas bases de dados e verificar se um determinado UP está utilizando o espectro destinado a ele.

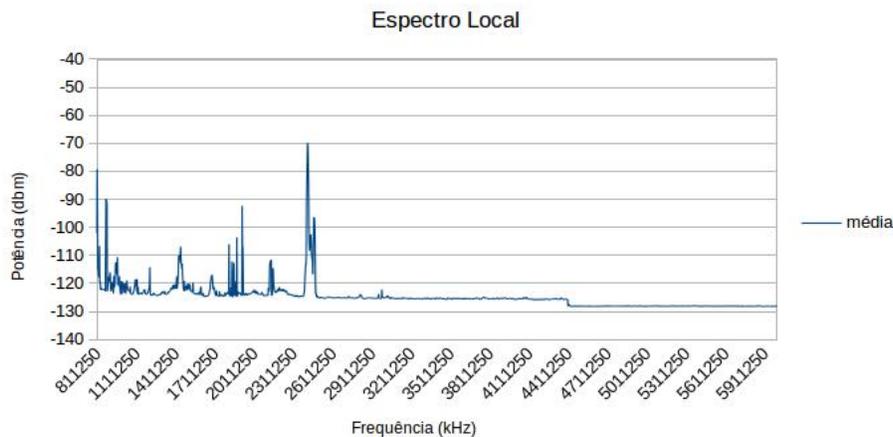


Figura 22 Espectro local de 800MHz a 5.9GHz.

Na Figura 22, observa-se o resultado da distribuição do espectro. Foi coletado o nível de ruído em *dBm* da faixa espectral de 800MHz a 5.9GHz, em intervalos de 2,5MHz, durante sete dias. Foi considerada somente a média do nível do ruído amostrado. Nota-se que o espectro é povoado intensamente entre as faixas de 800MHz a 2.6GHz. Depois dessa faixa, não temos atividades relevantes nesse espectro. Nos parágrafos seguintes, é discutido esse espectro detalhadamente, incluindo as atividades dos usuários primários.

Na Figura 23, tem-se o espectro que compreende a faixa de 800MHz a 1.5GHz. Verifica-se que possivelmente há atividades de usuários primários.

Considerando a Figura 23 e a Tabela 7, conclui-se que somente a frequência de 869MHz não poderia haver atividades de usuários secundários (US) juntamente com usuários primários (UP), pois, nessa frequência, o

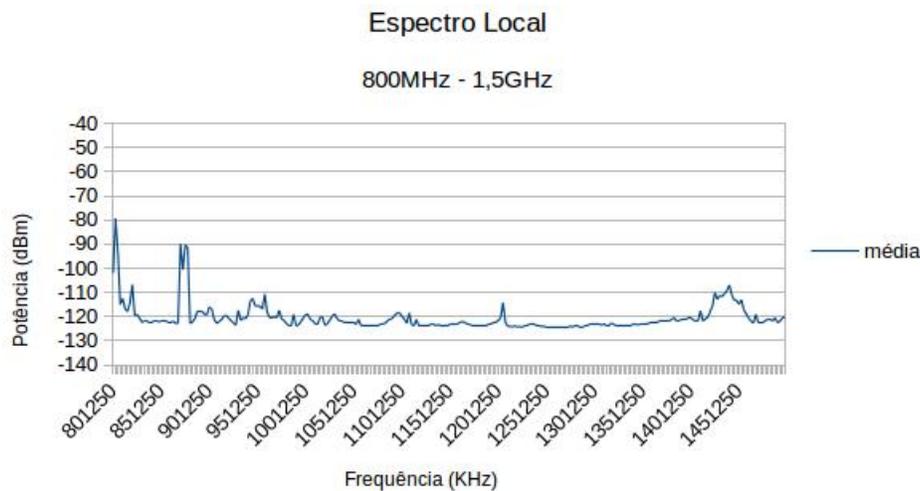


Figura 23 Espectro local de 800MHz a 1.5GHz.

USRP detectou um ruído médio de $-89dBm$. Levando em conta a QoS, não seria possível transmitir os dados do US, pois ele possivelmente iria interferir na transmissão do UP.

Tabela 7 Usuários primários na região de Lavras - MG entre a frequência 800MHz a 1.5GHz. Fonte: ANATEL

Nome Entidade	Serviço Prestado Pela Entidade	Transmissão(MHz)	Recepção(MHz)
G	Telecomunicações (Celular)	869,00000006	824,00000006
G	Telecomunicações (Celular)	890	845
H	Telecomunicações (Celular)	943,5	898,5
I	Serviço Publico Estadual	944	0
A	Telecomunicações (Rádio)	949,875	0
G	Telecomunicações (Celular)	952,50000003	907,50000003
J	Telecomunicações de Interesse Coletivo (Celular)	955	910
K	Telecomunicações (Celular)	957,5	912,5
L	Serviço Publico Municipal	1450	1515,5
M	Distribuidora de Energia	1498	1432,5

As faixa de frequência de 943MHz a 1.498GHz suportam os US, pois o ruído médio detectado para as frequências foi de $-115dBm$, já que o nível

de energia detectado está próximo do ruído base, isso considerando o ruído base aproximadamente $-128dBm$, o US poderia coexistir com o UP.

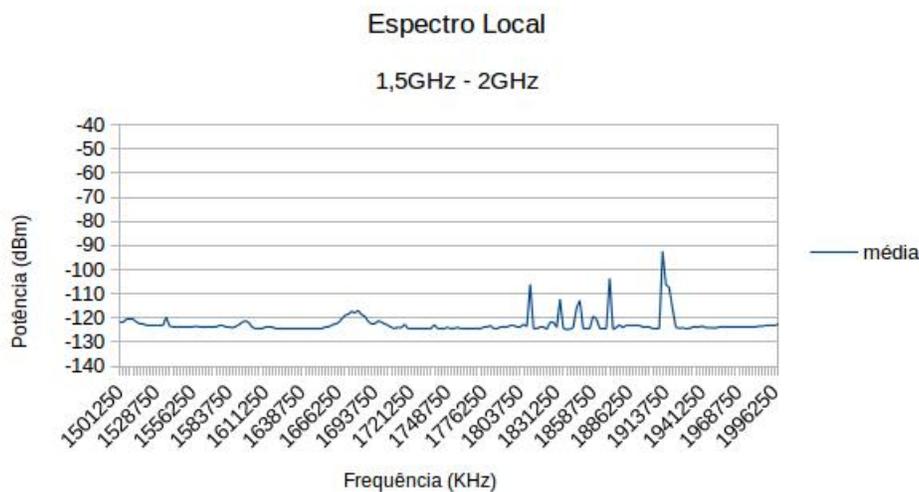


Figura 24 Espectro local de 1.5GHz a 2GHz.

Na Figura 24, observa-se a ocupação do espectro na faixa de 1.5GHz a 2GHz. Nela nota-se picos de utilização do espectro, porém a utilização da faixa não é total. Considerando a Tabela 8 temos um UP na faixa 1.870GHz e outro na faixa 1.902GHz para recepção. Os níveis de ruído para essas respectivas faixas foram $-103dBm$ e $-92dBm$. Considerando este fato, a coexistência dos US com os UP poderia ocorrer. Respeitando uma potência máxima de transmissão para não ocorrer interferências nessas duas faixas.

Observando a Figura 25 e a Tabela 9, verifica-se que não há presença de UP nesta faixa de espectro. Há uma pequena perturbação na frequência 2.131GHz de $-111dBm$, porém esse ruído não iria atrapalhar, em tese, a coexistência com o US.

Tabela 8 Usuários primários na região de Lavras - MG entre a frequência 1.5GHz a 2GHz. Fonte: ANATEL

Nome Entidade	Serviço Prestado Pela Entidade	Transmissão(MHz)	Recepção(MHz)
N	Telecomunicações (Celular)	1508,5	1443
L	Serviço Publico Municipal	1515,5	1450
N	Telecomunicações (Celular)	1805	1710
J	Telecomunicações de Interesse Coletivo (Celular)	1805	1710
N	Telecomunicações (Celular)	1805,00000001	1710,00000001
J	Telecomunicações de Interesse Coletivo (Celular)	1820	1725
H	Telecomunicações (Celular)	1825	1730
H	Telecomunicações (Celular)	1827,5	1732,5
H	Telecomunicações (Celular)	1830	1735
H	Telecomunicações (Celular)	1832,5	1737,5
K	Telecomunicações (Celular)	1835	1740
K	Telecomunicações (Celular)	1860	1765
H	Telecomunicações (Celular)	1865	1770
G	Telecomunicações (Celular)	1870	1775
G	Telecomunicações (Celular)	1870,00000001	1775,00000001
G	Telecomunicações (Celular)	1872,5	1777,5
G	Telecomunicações (Celular)	1875	1780
G	Telecomunicações (Celular)	1877,5	1782,5
K	Telecomunicações (Celular)	1982,5	1902,5
K	Telecomunicações (Celular)	1982,50000001	1902,50000001

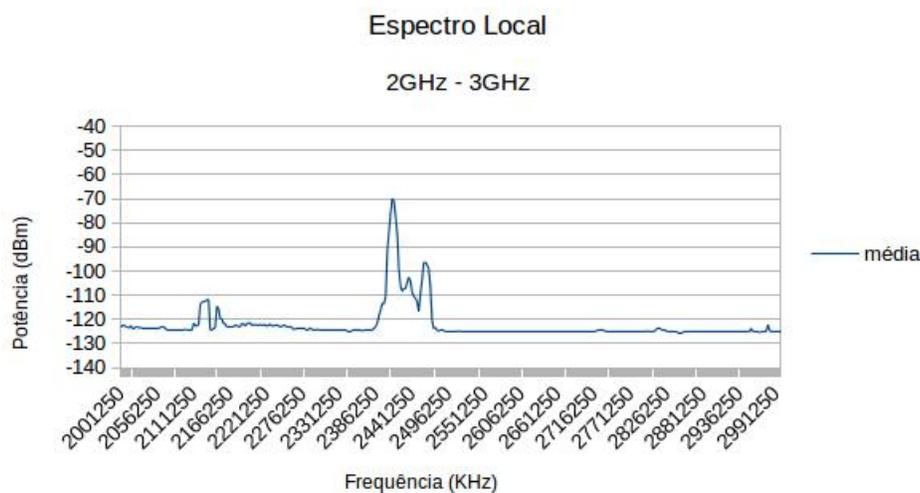


Figura 25 Espectro local de 2GHz a 3GHz.

Tabela 9 Usuários primários na região de Lavras - MG entre a frequência 2GHz a 3GHz. Fonte: ANATEL

Nome Entidade	Serviço Prestado Pela Entidade	Transmissão(MHz)	Recepção(MHz)
K	Telecomunicações (Celular)	2110	1920
J	Telecomunicações de Interesse Coletivo (Celular)	2145	1955
G	Telecomunicações (Celular)	2155	1965
K	Telecomunicações (Celular)	2235,5	2060,5
E	Serviço Público Estadual	2315	0
F	Telecomunicações (Rádio e TV)	2595	0
E	Serviço Público Estadual	2635	0
E	Serviço Público Estadual	2675	0

Ainda na Figura 25, fica visível a utilização intensa da faixa de frequência 2.4GHz. Reforçando a afirmação exposta por autores na literatura de que esta faixa está em intensa utilização.

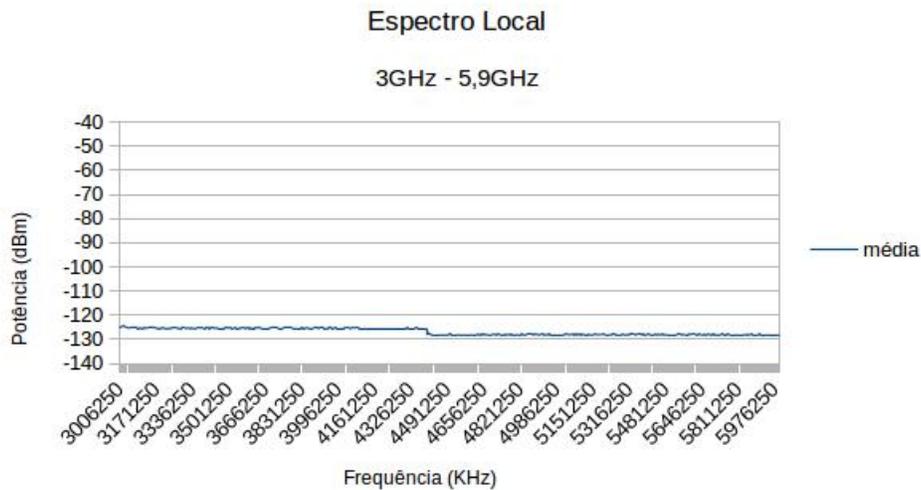


Figura 26 Espectro local de 3GHz a 5.9GHz.

Nas frequências restante do espectro analisado, que está representada pela Figura 26, não há atividades dos UP presentes na Tabela 10.

Tabela 10 Usuários primários na região de Lavras - MG entre a frequência 3GHz a 6.2GHz. Fonte: ANATEL

Nome Entidade	Serviço Prestado Pela Entidade	Transmissão(MHz)	Recepção(MHz)
M	Distribuidora de Energia (Geração e Transmissão)	4470	4770
M	Distribuidora de Energia (Geração e Transmissão)	4470,00000001	4770,00000001
M	Distribuidora de Energia (Geração e Transmissão)	4550	4850
M	Distribuidora de Energia (Geração e Transmissão)	4550,00000001	4850,00000001
O	Distribuidora de Energia (Telecomunicações)	5945,2	6197,24
O	Distribuidora de Energia (Telecomunicações)	5945,20000001	6197,24000001
O	Distribuidora de Energia (Telecomunicações)	5974,85	6226,89
K	Telecomunicações (Celular)	5974,85	6226,89
K	Telecomunicações (Celular)	6197,24	5945,2
K	Telecomunicações (Celular)	6197,24000001	5945,20000001
K	Telecomunicações (Celular)	6226,89	5974,85
K	Telecomunicações (Celular)	6226,89000001	5974,85000001
K	Telecomunicações (Celular)	6226,89000001	5974,85000001

6.2 Casos de Testes

Para os casos de testes, foram utilizadas as USRPs de modelo B200 e B210. Além das USRPs, foi utilizado o *framework* GNU-Radio, recomendado pela Ettus (2014) por prover interação com as placas USRPs. Também foi utilizada a máquina volk (*Vector-Optimized Library of Kernels*) `avx_64_mmx` para converter o valor complexo, coletado pela USRP, em ponto flutuante (WEST et al., 2016). Os nós considerados neste trabalho são compostos pelas placas USRPs e por computadores, cujas configurações são apresentadas na Tabela 11.

Na Tabela 12, são apresentados os padrões de tráfegos definidos para este trabalho. No padrão de tráfego baixo, *Low-L*, as mensagens enviadas entre dois nós possuem intervalo de tempo de *50ms*, para o padrão médio, *Medium-M*, de *12ms* de intervalo entre as mensagens geradas e para o padrão

Tabela 11 Configuração de Hardware

Software/Dispositivo	Versão/Modelo
Sistema Operacional	Ubuntu 14.04 LTS Kernel 3.16
GNU-Radio	v3.7
<i>VOLK Machine</i>	avx_64_mmx
Processador PC	Intel Core i7-4770 3.40GHz
Memória PC	8 GB
USRP	B200/B210

alto, *High-H*, de *8ms*. Foram escolhidos esses intervalos a fim de verificar a saturação da rede.

Tabela 12 Padrão de Tráfego

Intensidade de Mensagens Geradas	Atraso entre as Mensagens
<i>Low - L</i>	50 ms
<i>Medium - M</i>	12 ms
<i>High - H</i>	8 ms

Para o completo entendimento dos resultados coletados na métrica de *handoff*, foram definidas algumas classes de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13 Classes para a métrica de *handoff*

Intervalo de Frequências (<i>Hz</i>)	Classe
800000000 – 1499999999	<i>C1</i>
1500000000 – 2199999999	<i>C2</i>
2200000000 – 2999999999	<i>C3</i>
3000000000 – 3699999999	<i>C4</i>
3700000000 – 4399999999	<i>C5</i>
4400000000 – 5199999999	<i>C6</i>
5200000000 – 5800000000	<i>C7</i>

A classe *C1* representa as frequências mais baixas do espectro de frequências analisado (0,8*GHz* a 5,8*GHz*) e a classe *C7* representa as frequên-

cias mais altas. As frequências são organizadas de forma crescente dentre todas as classes.

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados coletados nos cenários interno (*indoor*) e externo (*outdoor*).

6.2.1 Cenários *indoor*

Para avaliar a performance do MDE-RNA, foram realizados experimentos considerando as métricas de taxa de entrega, latência e *Handoff* em quatro cenários distintos com dois, quatro e seis nós. Esses experimentos foram realizados em ambiente fechado. O primeiro cenário da Figura 27-(1) consiste de dois nós, um nó mestre e um nó escravo. Este cenário foi desenvolvido para verificar a conectividade entre os nós e testar as heurísticas propostas para as fases cognitivas.

Para o cenário 2, apresentado na Figura 27-(2), a rede foi composta de quatro nós. As trocas de mensagens no ciclo de transmissão de dados ocorreram de forma ortogonal entre pares de nós (S2,M) e (S3,S1). Já no cenário 3, a rede foi formada por 6 nós, Figura 27-(3). As trocas de mensagens no ciclo de transmissão de dados ocorreram entre os pares de nós (S3,M), (S2,S1) e (S4,S5). O objetivo do cenário (3) foi verificar a escalabilidade da solução proposta.

O cenário 4 da Figura 27-(4) tem como objetivo verificar o comportamento da RRC em um ambiente em que há a presença de um UP que tem a capacidade de variar a sua faixa de frequência e que opere em potência máxima. As faixas de frequências em que esse UP pode operar são: $943MHz$, $1450MHz$, $2155MHz$ e $5945MHz$. O UP varia sua frequência no intervalo de 30 segundos, com isso, é garantido que o UP troque de frequência na fase

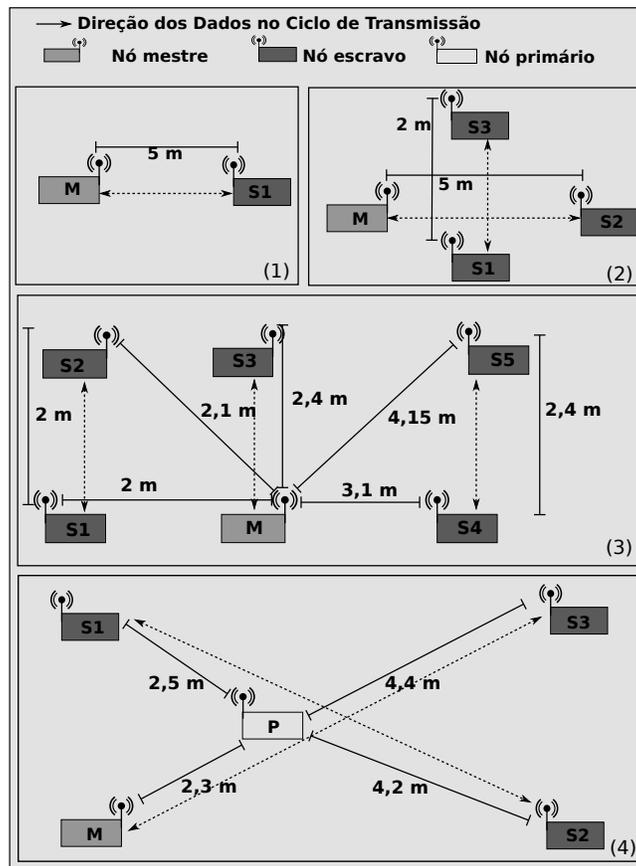


Figura 27 Cenários de testes em ambiente fechado (*indoor*).

de transmissão de dados. As trocas de mensagens ocorreram entre os nós (S2,S1) e (S3,M).

Para os cenários 1, 2 e 3, foram avaliados os módulos MDE-RNA, MDE-AHP e MDE-Cog. Já no cenário 4, foram avaliados os módulos MDE-RNA, MDE-AHP, MDE-Cog e uma RNA sem a base de dados da ANATEL. MDE-RNA_SA (RNA_Sem ANATEL).

Para os cenários internos (*indoor*), foram considerados duas estratégias para transmissão de dados. A primeira estratégia, sem leitura prévia

(SLP), o nó que está transmitindo um dado durante a fase de transmissão do dado considera que o canal escolhido pelo método de decisão está livre de UP. Para a segunda estratégia, leitura prévia (LP), o nó precisa de uma segunda garantia de que não há UP no canal. Além do processo que o método de decisão executa para verificar e escolher a melhor frequência que está livre de UP, o nó que está enviando o dado coleta uma amostra do canal e verifica o nível do ruído coletado, se o ruído estiver abaixo de $-85dBm$, o nó transmite normalmente os seus dados, caso contrário, o nó irá esperar 5 segundos para fazer uma nova amostragem do canal (vide Seção 5.2.4).

No cenário (1), foi considerada somente a estratégia SLP. Nos cenários (2) e (3), se consideram as estratégias SLP e LP. Já no cenário (4), foi considerada somente a estratégia LP.

Todos os resultados obtidos nos cenários de testes que consideram a estratégia SLP estão no APÊNDICE C.

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos em ambiente interno separados em: Taxa de Entrega, Latência e *Handoff*.

6.2.1.1 Taxa de Entrega

Os gráficos da Figura 28 apresentam os resultados para os cenários 2, 3 e 4 utilizando LP, considerando a métrica de taxa de entrega. Observa-se que o gráfico (a) da Figura 28, o MDE-RNA obteve melhores taxas de entrega comparado com os outros MDE. Considerando a estratégia LP, todos os MDE tiveram uma melhoria na taxa de entrega. Este fato é justificado pela realização da leitura prévia do espectro que além de garantir que não tenha UP na faixa de espectro, garante também que o canal estará livre de quaisquer interferências no momento em que há transmissões de dados.

Portanto, em cenários que há a estratégia LP, a taxa média de entrega tende a ser maior.

Na Figura 28-(b), que apresenta a taxa média de entrega de pacotes para o cenário 3 com LP, observa-se que o MDE-RNA foi melhor em até 21% e 40% que os modelos MDE-AHP e MDE-Cog para o padrão tráfego alto (H) respectivamente. No padrão de tráfego médio (M), o MDE-RNA foi melhor em até 6% e 39% que os modelos MDE-AHP e MDE-Cog respectivamente. No padrão de tráfego baixo (L), o MDE-RNA foi melhor em até 5% e 6% que os modelos MDE-AHP e MDE-Cog respectivamente. A redução na taxa de entrega para o padrão de tráfego alto (H) é explicada pela saturação do canal, já que existem três pares de nós enviando mensagens com intervalos de $8ms$, gerando um grande fluxo de mensagens próximo a capacidade do canal.

Como exposto anteriormente, no cenário (4) há a presença de um UP que transmite *bits* gerados por um gerador de ruído gaussiano. Esse UP tem a capacidade de alterar sua frequência a cada intervalo de 30 segundos. Adicionalmente, para neste cenário (4), foi desenvolvido um outro modelo de decisão do espectro, o modelo *RNA_SA*. Esse modelo consiste em uma RNA que foi treinada seguindo os mesmos parâmetros que a RNA do MDE-RNA, porém não foi considerada a base de dados da ANATEL.

No gráfico da Figura 28-(c), observa-se que o MDE-RNA foi melhor, considerando o tráfego alto (H), em até: 32,9%, 32% e 26% que os modelos MDE-AHP, MDE-Cog e MDE-RNA_SA respectivamente. Para o tráfego médio (M), o MDE-RNA foi melhor em até: 41%, 52,5% e 35,5% que os modelos MDE-AHP, MDE-Cog e MDE-RNA_SA respectivamente. Para o modelo de tráfego baixo (L), o módulo MDE-RNA foi melhor em

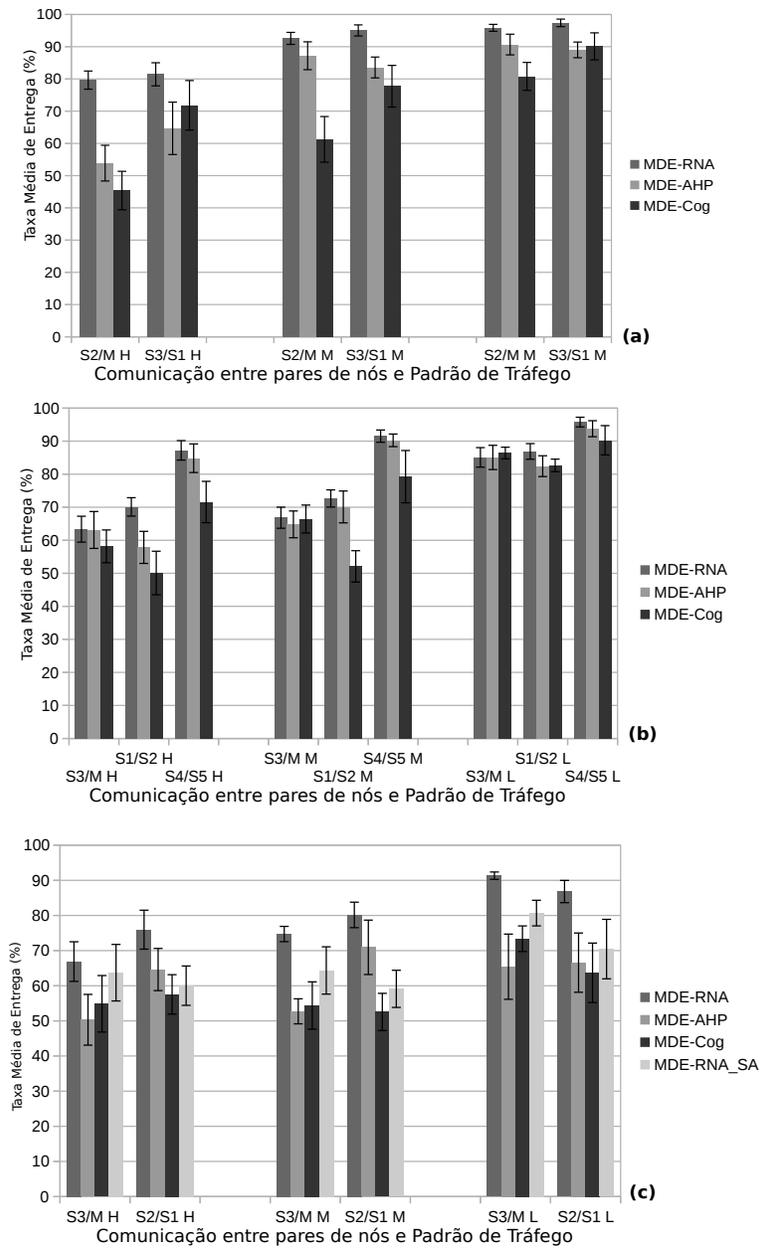


Figura 28 Taxa de Entrega para os Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando a estratégia LP

até: 39,5%, 36,3% e 23% que os modelos MDE-AHP, MDE-Cog e MDE-RNA_SA respectivamente.

É importante observar que a taxa de entrega que mais se equipara a taxa de entrega do MDE-RNA foi a do modelo MDE-RNA_SA. Esse fato se justifica, pois os dois métodos de decisão foram baseados na mesma técnica e também foram empregados os mesmos parâmetros. Entretanto, o MDE-RNA que considera a base de dados da ANATEL teve um desempenho melhor, isso comprova que a utilização da base de dados de UPs melhora o desempenho do módulo.

6.2.1.2 Latência

Os gráficos da Figura 29 apresentam os resultados para os cenários 2, 3 e 4 utilizando LP, considerando a métrica de latência. Observando-se os três gráficos constata-se que os três modelos de decisão tiveram seus desempenhos semelhantes. O MDE-RNA obtém ligeira vantagem em relação aos demais modelos de decisão. Esse fato é justificado, pois os três modelos utilizam a mesma camada MAC. Portanto, a diferença mínima do desempenho se deve à frequência escolhida por cada MDE.

6.2.1.3 Handoff

Nos gráficos da Figura 30, é apresentado o *handoff* obtido durante o experimento para o cenário (2), onde foi realizada a leitura prévia do espectro antes das transmissões de dados. Observa-se no gráfico da Figura 30-(a), que, o modelo MDE-RNA ficou 100% de seus ciclos na classe de frequências *C7* com frequência predominante em 5,8GHz garantindo assim, melhor taxa de entrega e melhor latência.

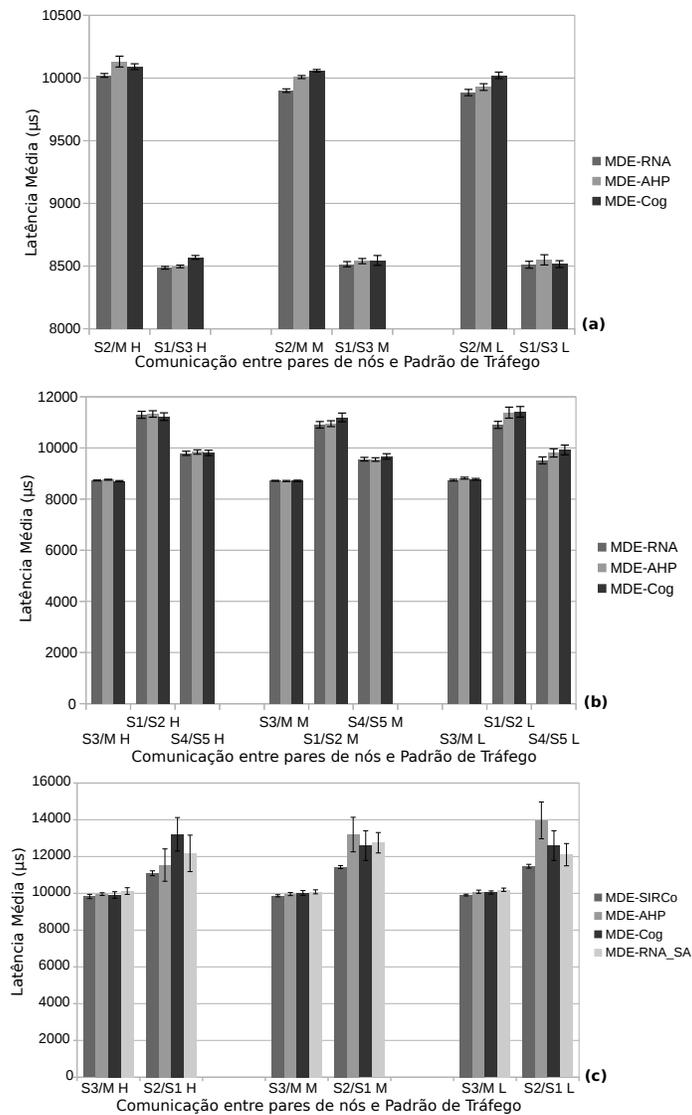


Figura 29 Latência em RTT para os Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando a estratégia LP

Na Figura 30-(b) e (c), são apresentados os gráficos de *handoff* para os modelos MDE-AHP e MDE-Cog respectivamente. Sendo que os dois modelos permaneceram com a mesma porcentagem de ciclos na classe C1, 66%.

Enquanto que no MDE-AHP, a frequência predominante foi de $1,28GHz$ no MDE-Cog foi de $0,86GHz$. O que difere no desempenho desses dois modelos foi que o MDE-AHP permaneceu por mais ciclos na classe *C7* em relação ao MDE-Cog, justificando assim, o melhor desempenho, tanto para a taxa de entrega, quanto para latência apresentados na Figura 29-(a).

Na Figura 31, são apresentados os gráficos de *handoff* para o cenário (3) com a leitura prévia do espectro. Observa-se que para o modelo MDE-RNA, Figura 31-(a), não ocorreu alteração da classe de frequências escolhida, ele se manteve na *C7*. Já nos outros dois modelos houve alterações nas classes de frequências. Essa fato é justificado, pois para esse experimento foi alterada a sensibilidade do rádio para $50dBm$, entretanto, a sensibilidade foi configurada com base na capacidade das USRPs. Como a USRP é um rádio mais robusto, optou-se por manter a sensibilidade do rádio no limiar padrão que é inferior a $25dBm$, com isso, a proposta deste trabalho pode ser empregadas em outros rádios. Além desse fato, os dados coletados para o treinamento da RNA foram com sensibilidade do rádio inferior a $25dBm$.

Para que a RNA tenha um desempenho melhor neste cenário, com a sensibilidade maior, ela teria que ser retreinada com dados gerados com a sensibilidade aumentada. Esse treinamento não foi realizado, pois o objetivo deste trabalho é desenvolver uma arquitetura que possa ser incorporada por outros rádios, se desenvolver um modelo de decisão em que a RNA seja treinada com a sensibilidade alta ela só seria capaz de funcionar perfeitamente nas USRPs já que a maioria dos rádios que são comercializados não são tão sensíveis quanto as USRPs.

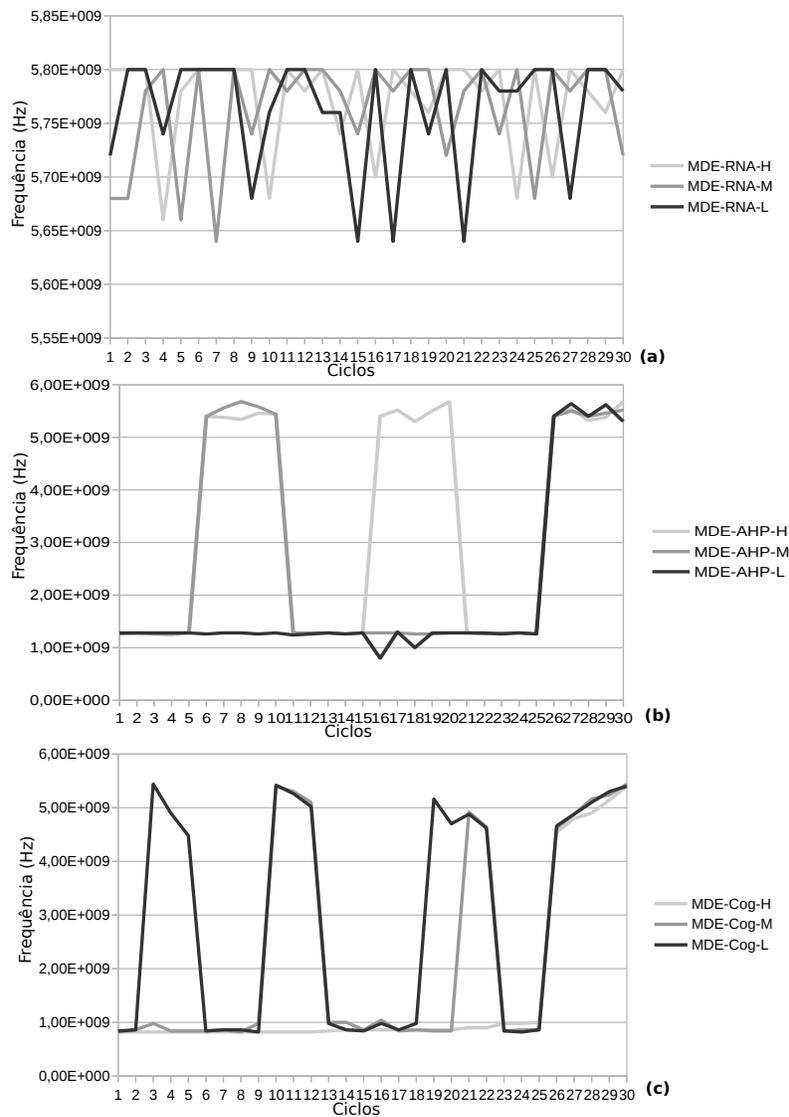


Figura 30 *Handoff* dos modelos de decisão para o Cenário (2) utilizando LP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.

Os gráficos de *handoff* são apresentados na Figura 32. Observa-se que o MDE-RNA se manteve nas frequências de classe C7 sendo que a sua taxa de entrega, representada pelo gráfico da Figura 28-(C), se manteve

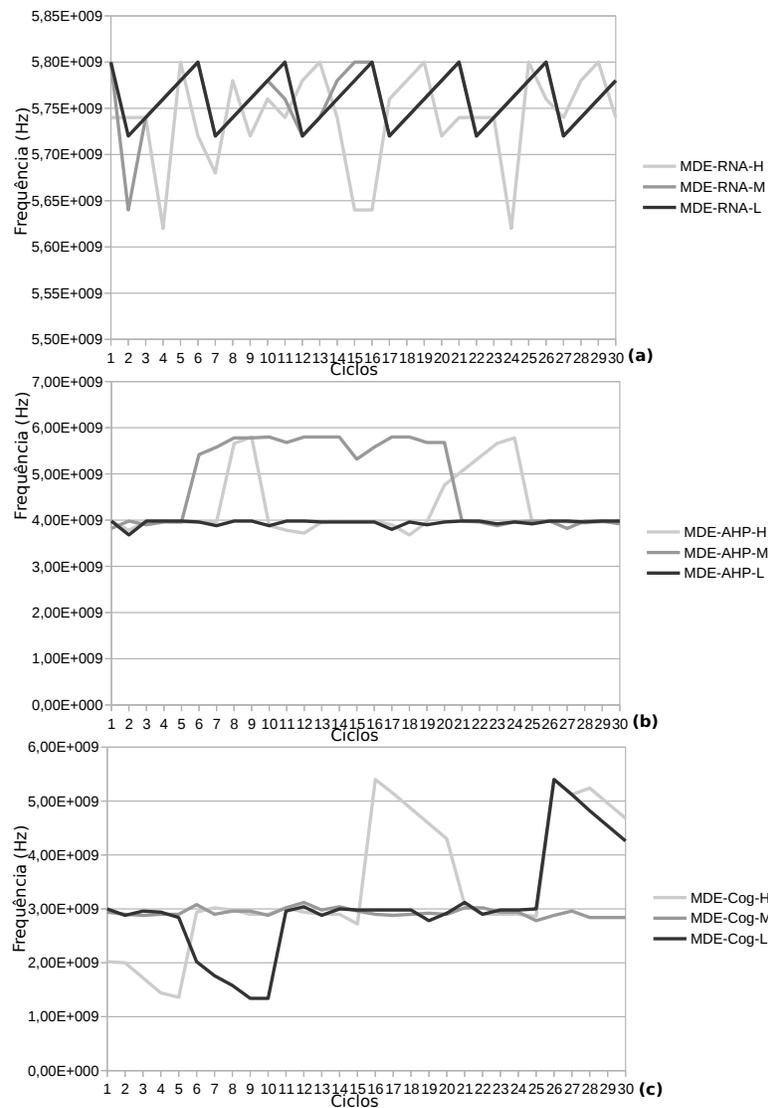


Figura 31 *Handoff* dos modelos de decisão para o Cenário (3) utilizando LP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.

maior do que os outros MDE. Nota-se também que a RNA_SA que não foi treinada com a base de dados da ANATEL obteve um desempenho semelhante ao MDE-AHP. Esse fato justifica a alternância dos dois MDEs nos

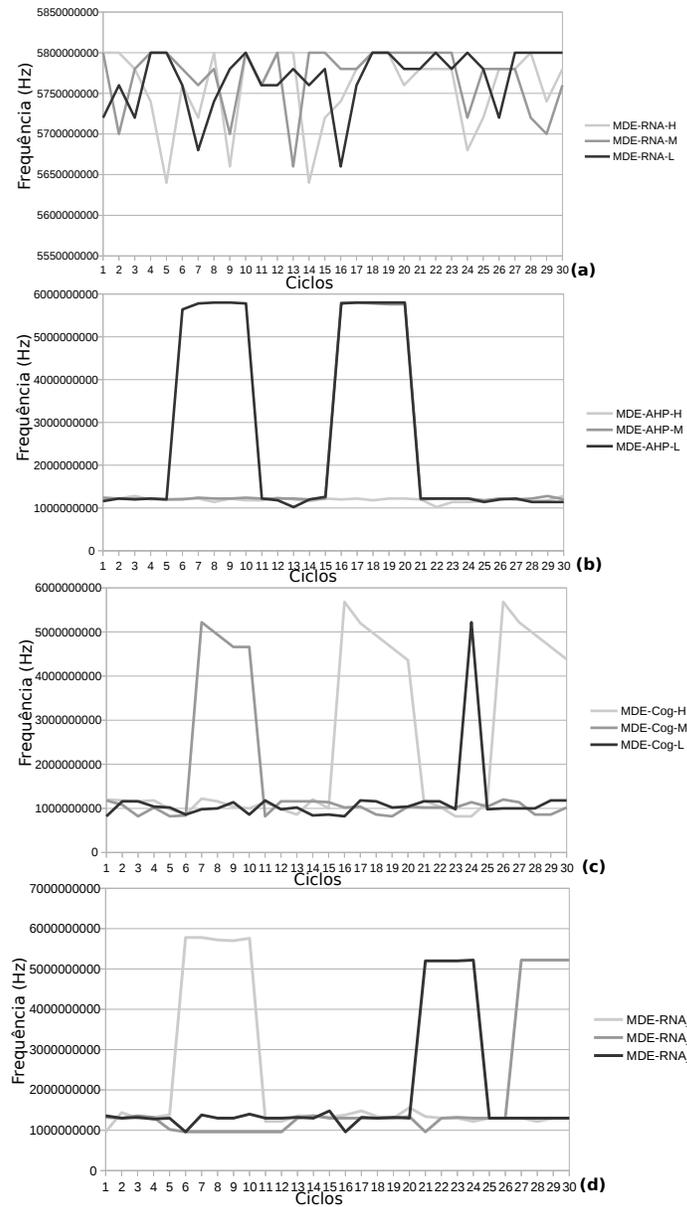


Figura 32 *Handoff* dos modelos de decisão para o Cenário (4) utilizando LP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP, (c) MDE-Cog e (d) RNA_SA.

três modelos de tráfegos. O MDE-AHP se manteve 83,33% e 16,66% dos ciclos nas classes *C1* e *C7*, respectivamente, enquanto que a RNA-SA se manteve 84,44%, 1,11% e 14,44% dos ciclos nas classes *C1*, *C2* e *C7* respectivamente.

6.2.2 Cenários *outdoor*

Para a avaliação de desempenho do protocolo e da arquitetura proposta, foram definidos três cenários em ambiente externo, onde há a presença das intempéries, como por exemplo: radiação solar.

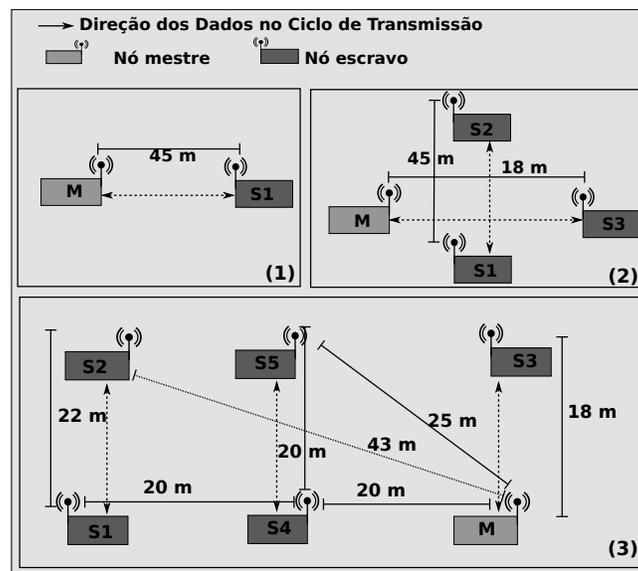


Figura 33 Cenários de testes em ambiente externo (*outdoor*).

Na Figura 33, são apresentados os três cenários de avaliação. No cenário 33-(1), observa-se a presença de dois nós, um nó mestre e um nó escravo. Esse cenário, assim como o cenário (1) *indoor*, teve como objetivo verificar a conectividade da rede e o seu comportamento em um ambiente no qual há pouca interferência devido à presença de somente dois nós.

O cenário (2) é apresentado na Figura 33-(2). Este cenário foi composto por dois pares de nós (M,S3) e (S2,S1). Já o cenário (3), representado pela Figura 33-(3), foi composto por três pares de nós (M,S3), (S5,S4) e (S2,S1).

Todos os cenários consideram a leitura prévia do espectro. Todos os resultados obtidos consideram um intervalo de confiança de 95%. As métricas utilizadas para a avaliação são: taxa de entrega de pacotes, latência e *handoff*.

6.2.2.1 Taxa de Entrega

Na Figura 34, são apresentados os gráficos de taxa de entrega para o cenário externo (1). No gráfico da Figura 34-(a) observa-se as taxas médias de entrega dos pacotes para os três modelos avaliados. O MDE-RNA foi melhor em até 9,6% e 10,6% que o MDE-AHP e o MDE-Cog respectivamente. Os modelos MDE-AHP e MDE-Cog tiveram um desempenho similar.

No gráfico da Figura 34-(b), observa-se as taxas de entregas para o cenário 2, onde o método de decisão MDE-RNA foi mais eficiente nos três modelos de tráfegos, sendo que o MDE-RNA foi melhor em até 218% que o MDE-AHP e até 142% melhor que o MDE-Cog.

Os resultados para o cenário externo (3) são apresentados na Figura 34-(c). O MDE-RNA obteve melhores taxas de entrega média em relação aos outros MDE, isso se deve ao fato do MDE-RNA priorizar as frequências que garantem maior banda e menor probabilidade de ocorrência de UP. O MDE-RNA obteve um desempenho melhor que o MDE-AHP em até 69% e em até 80% que o método de decisão MDE-Cog.

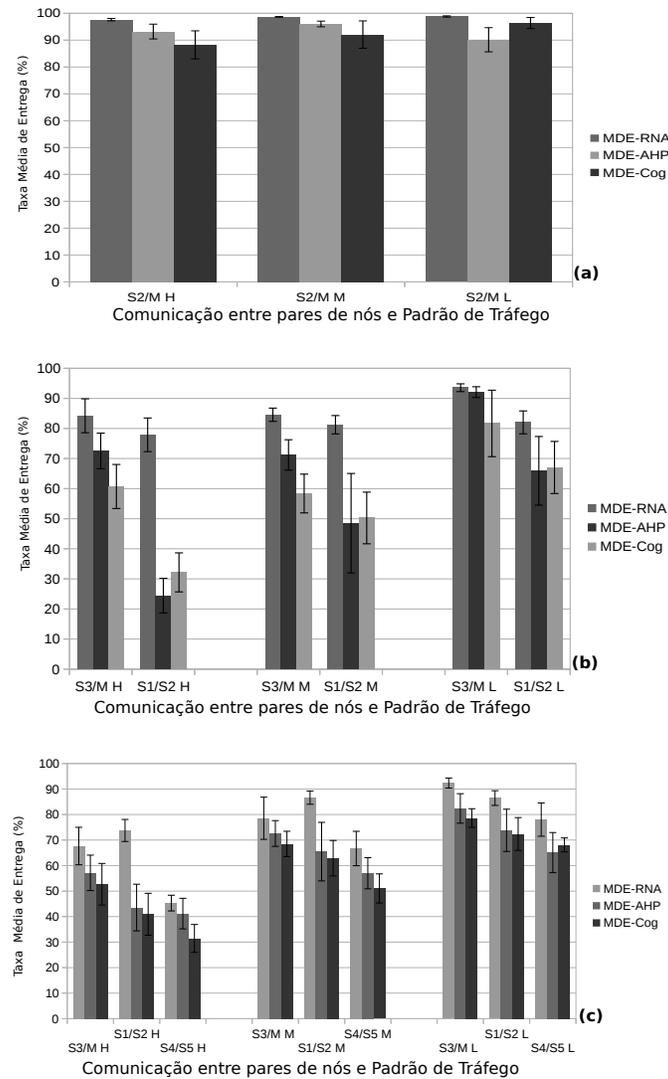


Figura 34 Taxa de entrega de pacotes para os Cenário 1 (a), Cenário 2 (b) e Cenário 3 (c) considerando a estratégia LP

6.2.2.2 Latência

Na Figura 35 são apresentadas as latências médias para os três cenários executados em ambiente externo. Observa-se que o MDE-RNA foi o

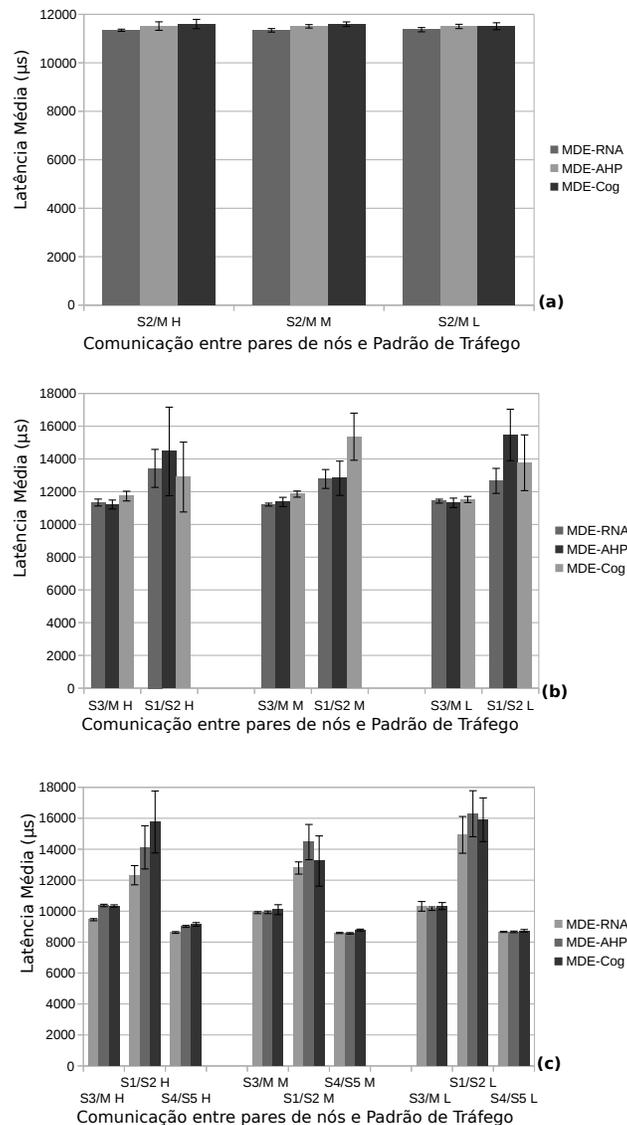


Figura 35 Latência em RTT para os Cenário 1 (a), Cenário 2 (b) e Cenário 3 (c) considerando a estratégia LP

módulo de decisão do espectro que proporcionou menores latências. Entretanto, a latência apresentada pelos demais módulos é similar ao MDE-RNA. Esse fato se justifica pois, todos os módulos utilizam os mesmos métodos

para transmissão de mensagens. A discrepância mínima apresentada se deve às frequências escolhidas por cada MDE. Por essa razão, o MDE-RNA é melhor que os outros módulos, mesmo que com diferença pequena.

6.2.2.3 Handoff

Na Figura 36, são apresentados os *handoff* para todos os módulos. Mostrando que no cenário interno (1), o MDE-RNA permaneceu 100% de seus ciclos na classe que representa as frequências mais altas *C7*. Enquanto que, os módulos MDE-AHP e MDE-Cog permaneceram 92,22% e 95,55% na classe *C1*, respectivamente, e 7,77% e 4,44% para a classe *C7* respectivamente. Evidenciando assim, que as frequências predominantes dos três módulos foram 5,8GHz para o MDE-RNA, 1,28GHz para o MDE-AHP e 0,86GHz para o MDE-Cog. Com isso, pode-se afirmar que o MDE-RNA garantiu maior largura de banda, conseqüentemente, maior taxa de entrega.

O *handoff* para todos os módulos são apresentados na Figura 37. O MDE-RNA permaneceu 98,88% dos seus ciclos nas frequências da classe *C7*, justificando assim o seu desempenho, já que a classe *C7* garante maior largura de banda. Para o módulo MDE-AHP, o seu modelo de decisão permitiu que o mesmo permanecesse somente 20% na classe *C7*, enquanto que o MDE-Cog permaneceu 3,33% na *C7*. Entretanto, essa diferença entre o MDE-AHP e o MDE-Cog não refletiu em um desempenho maior do MDE-AHP sobre o MDE-Cog. O desempenho do MDE-AHP foi em média 1,44% melhor que o MDE-Cog.

Considerando os gráficos da Figura 38, o MDE-RNA permaneceu 100% dos ciclos na classe de frequências *C7*, sendo que a frequência predominante desta classe foi de 5,8GHz. Sendo assim, pode-se afirmar que o

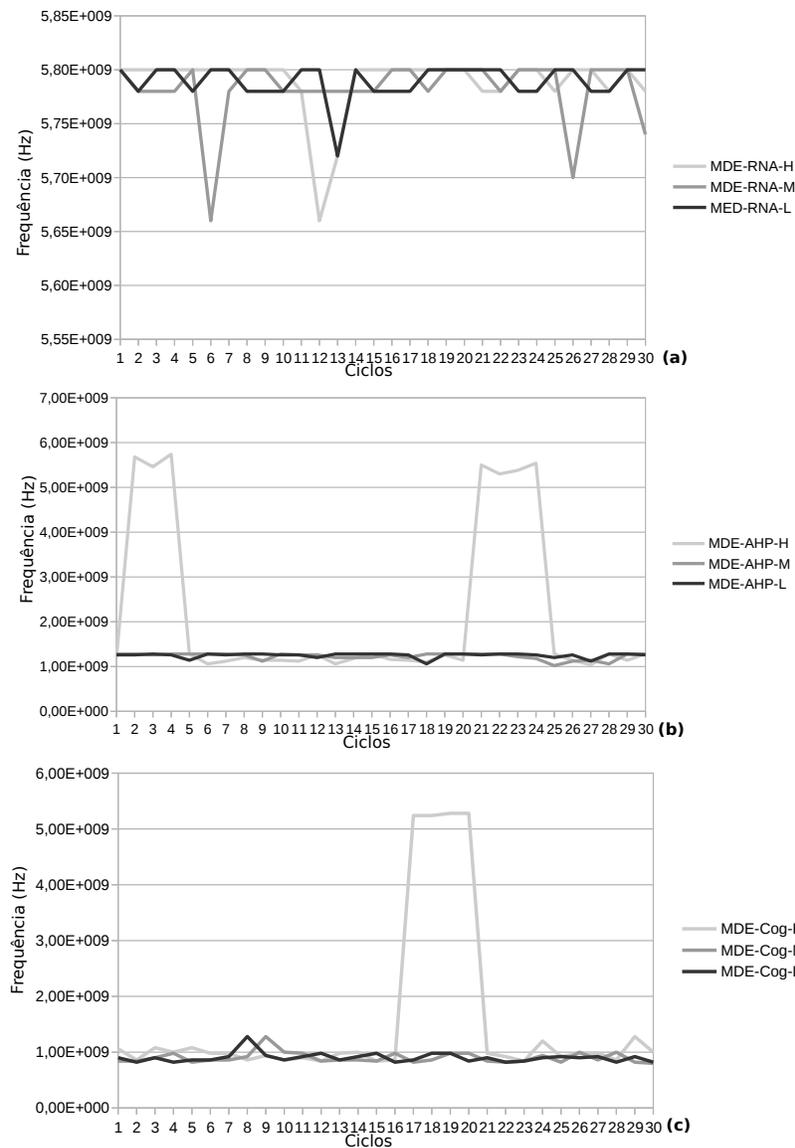


Figura 36 *Handoff* dos modelos de decisão para o Cenário externo (1) utilizando LP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.

MDE-RNA garantiu maior largura de banda e, conseqüentemente, melhor taxa média de entrega de pacotes e menor latência média.

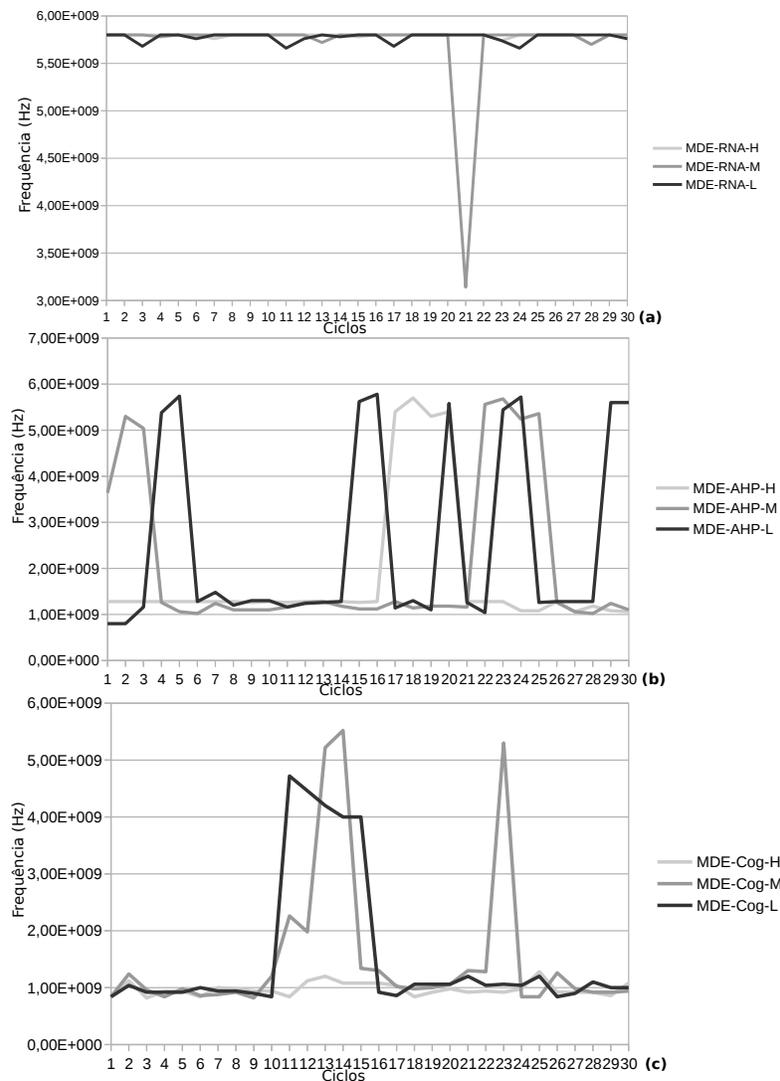


Figura 37 *Handoff* dos modelos de decisão para o Cenário externo (2) utilizando LP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.

Já o MDE-AHP acionou frequências de quatro classes diferentes $C1$, $C2$, $C5$ e $C7$, sendo que o mesmo gastou mais ciclos na $C1$ com frequência predominante de $1,28GHz$. O fato do MDE-AHP ter permanecido 31,1% dos ciclos na $C7$ garantiu que seu desempenho fosse melhor que o MDE-

Cog, na média, o MDE-AHP entregou 22,7% a mais de pacotes do que o MDE-Cog considerando todos os modelos de tráfego.

Para o MDE-Cog, as classes de frequências selecionadas foram: *C1*, *C5* e *C7*. Os ciclos gastos nessas classes foram: 84,4%, 5,55% e 10% respectivamente.

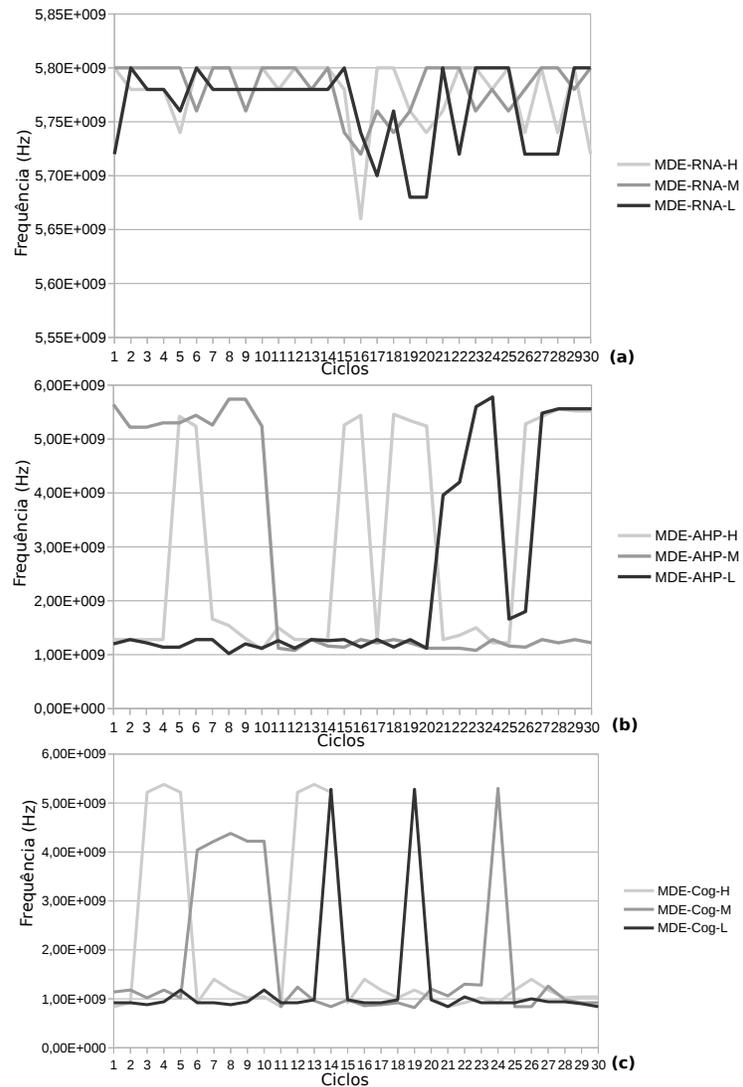


Figura 38 *Handoff* dos modelos de decisão para o Cenário externo (3) utilizando LP dos módulos: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o protocolo e a arquitetura SIRCo. A arquitetura foi desenvolvida para redes de rádios cognitivos, o módulo de decisão do espectro empregado no protocolo utiliza uma rede neural artificial que foi treinada considerando uma base de dados local e outra com dados reais de usuários primário de uma região, disponibilizada pela ANATEL. A RNA foi capaz de garantir a maior largura de banda, sem presença de UPs interferentes.

A RNA desenvolvida foi incorporada no *framework* utilizado para o desenvolvimento dos protocolos. Assim como foram criados módulos de sensoriamento do espectro, decisão do espectro, compartilhamento do espectro e mobilidade do espectro para que o *framework* possa prover suporte para as RRCs.

Experimentos realizados comprovaram a afirmação de Akyildiz et al. (2008), que um modelo eficiente de decisão do espectro não deve basear somente em um parâmetro físico do canal. Como mostram os resultados, o MDE-Cog, que é um protocolo que considera somente o nível de ruído amostrado no canal, não obteve resultados satisfatórios em comparação aos modelos MDE-RNA e MDE-AHP.

O modelo de decisão do espectro baseado em AHP utiliza mais de um parâmetro de entrada para o seu módulo de decisão. Resultados mostram que com a utilização de mais de um parâmetro para o módulo de decisão torna o método mais eficiente, entretanto, simplesmente adicionar mais parâmetros não garante a melhor escolha do canal.

Resultados mostraram que considerando o RSSI, uma base de dados local do comportamento do espectro e uma base de dados contendo infor-

mações referentes aos usuários primários tornam o método de decisão capaz de garantir maior largura de banda e altas taxas de entrega de pacotes.

Observou-se que mesmo adicionando mais parâmetros de entrada ao método de decisão, a latência não é afetada, pois os modelos de decisão do espectro avaliados utilizam o mesmo protocolo MAC. Assim, a latência não sofre grandes variações.

Experimentos que utilizam a estratégia *Leitura Prévia* (LP) têm desempenho melhor que os experimentos que utilizaram a estratégia *Sem Leitura Prévia* (SLP). Isso se justifica já que, a estratégia LP, além de garantir que não haja UP na faixa de frequência escolhida pelo modelo de decisão, minimiza as colisões de pacotes entre os nós da RRC.

Foram considerados dois ambientes de teste: Ambiente Interno (AI) e Ambiente Externo (AE). Os resultados mostram que a variação de *handoff* é maior em AI do que em AE, devido ao alto nível de interferência que os próprios nós da RRC gera em AI.

Também foi implementado um nó que tem como função simular o comportamento de um UP que varia entre cinco frequências. Esse UP tem como objetivo gerar perturbações na RRC.

Como proposta de trabalhos futuros, tem-se a possibilidade da implementação do SIRC_o baseando-se em outros protocolos MAC, como o utilizado no padrão IEEE 802.11.

Também como trabalho futuro, há a possibilidade da implementação de um algoritmo de roteamento para nós escravos e um algoritmo de roteamento para nós mestre. Com isso, a RRC se expande e adquire a capacidade de trabalhar em *clusters*.

Por fim, a pesquisa realizada neste trabalho pode ser expandida para levar em consideração vários desafios e oportunidades identificadas durante a realização dessa pesquisa:

- Testes utilizando antenas com ganho maior e distâncias maiores entre os nós (quilômetros);
- Introdução de cenários que considerem nós móveis;
- Adicionar mecanismo que possibilita controlar a potência do rádio de forma dinâmica, minimizando assim a interferência gerada nos demais nós durante a fase de transmissão de dados. Com isso, há a possibilidade de melhorar a taxa de entrega;
- Verificar a viabilidade da solução proposta em outros rádios definidos por *software*.
- Utilizar outras plataformas de implementação como o *LabView*.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. Regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita. **Diário Oficial da União** Brasília, DF, 7 ago. 2007.

AKAN, O.; KARLI, O.; ERGUL, O. Cognitive radio sensor networks. **Network**, New York, v. 23, n. 4, p. 34–40, July 2009.

AKBAR, I.; TRANTER, W. Dynamic spectrum allocation in cognitive radio using hidden markov models: Poisson distributed case. In: IEEE REGION SOUTH EAST CONFERENCE, 3., 2007, Richmond. **Proceedings...** Richmond: IEEE, 2007. p. 196–201.

AKYILDIZ, I. et al. A survey on spectrum management in cognitive radio networks. **Communications Magazine**, New York, v. 46, n. 4, p. 40–48, Apr. 2008.

ANSARI, J.; ZHANG, X.; MÄHÖNEN, P. A decentralized mac for opportunistic spectrum access in cognitive wireless networks. In: WORKSHOP ON COGNITIVE RADIO NETWORKS, 2010, New York. **Proceedings...** New York: ACM, 2010. p. 13–18.

BAI, S.; ZHOU, X.; XU, F. "Soft decision" spectrum prediction based on back-propagation neural networks. In: COMPUTING, MANAGEMENT AND TELECOMMUNICATIONS INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2014, Da Nang. **Proceedings...** Da Nang: IEEE, 2014. p. 128–133.

BAUM, L. E. et al. A maximization technique occurring in the statistical analysis of probabilistic functions of markov chains. **The Annals of Mathematical Statistics**, Baltimore, v. 41, n. 1, p. pp. 164–171, Feb. 1970.

BLOESSL, B. et al. A GNU Radio-based IEEE 802.15.4 Testbed. In: 12. GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze (FGSN 2013). Cottbus: IEEE, 2013. p. 37–40.

BLOSSOM, E. et al. **GNUradio The free and open software radio ecosystem**. USA: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://gnuradio.org/>>. Acessado em: 2016.04.19.

CABRIC, D.; MISHRA, S.; BRODERSEN, R. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios. In: **SIGNALS, SYSTEMS AND COMPUTERS, CONFERENCE RECORD**, 38., 2004, California. **Proceedings...** California: IEEE, 2004. p. 772–776.

CACCIAPUOTI, A.; AKYILDIZ, I.; PAURA, L. Optimal primary-user mobility aware spectrum sensing design for cognitive radio networks. **Selected Areas in Communications**, New York, v. 31, n. 11, p. 2161–2172, Nov. 2013.

CHEN, Y.-S.; HONG, J.-S. A relay-assisted protocol for spectrum mobility and handover in cognitive lte networks. **Systems Journal**, New York, v. 7, n. 1, p. 77–91, Mar. 2013.

COMMISSION, F, C. **Norm, FCC 03-322**. Califórnia: Federal Communications Commission FCC, 2003. Disponível em: <<http://web.cs.ucdavis.edu/~liu/289I/Material/FCC-03-322A1.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2015.

CORREIA, L. et al. A framework for cognitive radio wireless sensor networks. In: **COMPUTERS AND COMMUNICATIONS IEEE SYMPOSIUM ON**, 2012, Cappadocia. **Proceedings...** Cappadocia: IEEE, 2012. p. 611–616.

CYPRIANI, M. et al. Open wireless positioning system: a wi-fi-based indoor positioning system. In: **VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE FALL**, 70., 2009, Anchorage. **Proceedings...** Anchorage: IEEE, 2009. p. 1–5.

DARWIN, C. **A origem das espécies**. São Paulo: Editora Martin Claret, 2009. 574 p.

DEMPSTER, A. P.; LAIRD, N. M.; RUBIN, D. B. Maximum likelihood from incomplete data via the em algorithm. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, London, v. 39, n. 1, p. 1–38, Apr. 1977.

DOMENICO, A. D.; STRINATI, E.; BENEDETTO, M. D. A survey on mac strategies for cognitive radio networks. **Communications Surveys Tutorials**, New York, v. 14, n. 1, p. 21–44, 2012.

DUDLEY, S. et al. Practical issues for spectrum management with cognitive radios. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 102, n. 3, p. 242–264, Mar. 2014.

ETTUS, M. **Ettus Research**. USA: [s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.ettus.com/site/about>>. Acessado em: 10 maio 2016.

FERRARI, P. et al. Coexistence of wireless sensor networks in factory automation scenarios. **Sensors Transducers Journal**, Boston, v. 90, n. 4, p. 48–60, April 2008.

FORNEY G.D., J. The viterbi algorithm. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 61, n. 3, p. 268–278, Mar. 1973.

GAVRILOVSKA, L. et al. Medium access control protocols in cognitive radio networks: Overview and general classification. **Communications Surveys Tutorials**, New York, v. 16, n. 4, p. 2092–2124, 2014.

GE, F. et al. Cognitive radio: From spectrum sharing to adaptive learning and reconfiguration. In: AEROSPACE CONFERENCE, 2008, Big Sky. **Proceedings...** Big Sky: IEEE, 2008. p. 1–10.

GE, Y. et al. ADSD: An automatic distributed spectrum decision method in cognitive radio networks. In: FUTURE INFORMATION NETWORKS INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 1., 2009, Beijing. **Proceedings...** Beijing: IEEE, 2009. p. 253–258.

GHOSH, C. et al. Markov chain existence and Hidden Markov models in spectrum sensing. In: PERVASIVE COMPUTING AND COMMUNICATIONS INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2009, Galveston. **Proceedings...** Galveston: IEEE, 2009. p. 1–6.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e práticas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 906 p.

HE, A. et al. A survey of artificial intelligence for cognitive radios. **Vehicular Technology**, New York, v. 59, n. 4, p. 1578–1592, May 2010.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. 211 p.

HOW, K. C.; MA, M.; QIN, Y. A cognitive power-controlled rate-adaptive mac protocol to support differentiated service in wireless mesh networks. In: INFORMATION, COMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING, INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 7., 2009, Macau. **Proceedings...** Macau: IEEE, 2009. p. 1–5.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Recommended practice for telecommunications and information exchange between systems.** Local and metropolitan area networks specific requirements – Part 15.2: coexistence of wireless personal area networks with other wireless devices operating in unlicensed frequency band. New York: IEEE, 2003.

MIRANDA JUNIOR, G.; MARQUES, A.; CORREIA, L. H. LMT-MAC: um protocolo mac multicanal livre de colisões para redes de sensores sem fio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS, 34., Salvador. **Proceedings...** Salvador: SBC, 2016. No prelo.

KOZA, J. R. **Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection.** Cambridge: MIT Press, 1992. 840 p.

KUMAR, V. et al. FPGA based decision making engine for cognitive radio using genetic algorithm. In: INDUSTRIAL AND INFORMATION SYSTEMS, INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 8., 2013, Peradeniya. **Proceedings...** Peradeniya: IEEE, 2013. p. 633–636.

LASORTE, N.; RAJAB, S.; REFAI, H. Experimental assessment of wireless coexistence for 802.15.4 in the presence of 802.11g/n. In: ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON, 2012, Pittsburgh. **Proceedings...** Pittsburgh: IEEE, 2012. p. 473–479.

LEE, W.-Y.; AKYLDIZ, I. A spectrum decision framework for cognitive radio Networks. **Mobile Computing**, New York, v. 10, n. 2, p. 161–174, Feb. 2011.

LIN, H.-P.; LIU, K.-H.; HSIEH, H.-Y. Design of power control protocols for spectrum sharing in cognitive radio networks: A game-theoretic perspective. In: COMMUNICATIONS, INTERNATIONAL CONFERENCE ON, Cape Town. **Proceedings...** Cape Town: IEEE, 2010. p. 1–6.

MACKENZIE, P. et al. IRIS - A system for developing reconfigurable radios. In: DSP ENABLED RADIO, COLLOQUIUM ON, Scotland. **Proceedings...** Scotland: IET, 2003. p. 1–11.

MARQUES, A. et al. ISCRa - An intelligent sensing protocol for cognitive radio. In: SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATION, 2016), Messina. **Proceedings...** Messina: IEEE, 2016. No prelo.

MARQUES, A. et al. SIRCo - Um protocolo de sensoriamento inteligente para rádios cognitivos. In: WORKSHOP DE GERÊNCIA E OPERAÇÃO DE REDES E SERVIÇOS, 21., 2016, Salvador. **Anais...** Salvador: SBC, 2016. No prelo.

MASONTA, M. T.; MZYECE, M.; MEKURIA, F. A comparative study of cognitive radio platforms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF EMERGENT DIGITAL ECOSYSTEMS, 2012, New York. **Proceedings...** New York: ACM, 2012.p. 145–149.

MASONTA, M.; MZYECE, M.; NTLATLAPA, N. Spectrum decision in cognitive radio Networks: a survey. **Communications Surveys Tutorials**, New York, v. 15, n. 3, p. 1088–1107, 2013.

MCHENRY, M. A. et al. Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON TECHNOLOGY AND POLICY FOR ACCESSING SPECTRUM, 1., 2006, New York. **Proceedings...** New York: ACM, 2006. p. 1–2.

MEGHANATHAN, N.; REDDY, Y. B. **Cognitive Radio Technology Applications for Wireless and Mobile Ad Hoc Networks**. USA: Information Science Reference, 2013. 370 p.

MILLER, S.; KWONG, W. Trellis demodulation of two-level reed-solomon-modulated FH-CDMA wireless communication systems. In: SYSTEMS, APPLICATIONS AND TECHNOLOGY CONFERENCE, 2012, Farmingdale. **Proceedings...** Farmingdale: IEEE, 2012. p. 1–6.

MITOLA, J. **Cognitive radio: model-based competence for software radios**. 1999. 243 p. Tese (Doutorado) – The Royal Institute of Technology, Stockholm, 1999.

MITOLA, J.; MAGUIRE G.Q., Cognitive radio: making software radios more personal. **Personal Communications**, New York, v. 6, n. 4, p. 13–18, Aug. 1999.

MOGHAL, M. R.; KHAN, M.; BHATTI, H. Spectrum optimization in cognitive radios using elitism in genetic algorithms. In: EMERGING TECHNOLOGIES, INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 6., 2010, Islamabad. **Proceedings...** Islamabad: IEEE, 2010. p. 49–54.

MURRAY, B.; ZAGHLOUL, A. A survey of cognitive beamforming techniques. In: RADIO SCIENCE MEETING UNITED STATES NATIONAL COMMITTEE OF URSI NATIONAL, Boulder. **Proceedings...** Boulder: IEEE, 2014. p. 1.

ONER, M.; JONDRAL, F. On the extraction of the channel allocation information in spectrum pooling systems. **Selected Areas in Communications**, New York, v. 25, n. 3, p. 558–565, Apr. 2007.

PATIL, K.; PRASAD, R.; SKOUBY, K. A survey of worldwide spectrum occupancy measurement campaigns for cognitive radio. In: DEVICES AND COMMUNICATIONS INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2011, Mesra. **Proceedings...** Mesra: IEEE, 2011. p. 1–5.

PRINCIPE, J.; CHALASANI, R. Cognitive architectures for sensory processing. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 102, n. 4, p. 514–525, Apr. 2014.

RABINER, L. A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 77, n. 2, p. 257–286, Feb. 1989.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process in natural resource and environmental decision making**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. 307 p.

SAIFAN, R.; KAMAL, A.; GUAN, Y. Spectrum decision for efficient routing in cognitive radio network. In: MOBILE ADHOC AND SENSOR SYSTEMS INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 9., 2012, Las Vegas. **Proceedings...** Las Vegas: IEEE, 2012. p. 371–379.

SHARMA, V.; BOHARA, V. Exploiting machine learning algorithms for cognitive radio. In: ADVANCES IN COMPUTING, COMMUNICATIONS AND INFORMATICS INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2014, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: IEEE, 2014. p. 1554–1558.

SONG, Y.; XIE, J. ProSpect: A proactive spectrum handoff framework for cognitive radio ad hoc networks without common control channel. **Mobile Computing**, New York, v. 11, n. 7, p. 1127–1139, July 2012.

STOTAS, S.; NALLANATHAN, A. Enhancing the capacity of spectrum sharing cognitive radio networks. **Vehicular Technology**, New York, v. 60, n. 8, p. 3768–3779, Oct. 2011.

TECH, V. **Open-Source SCA implementation - embedded (OSSIE)**. Virginia: [s.n], 2014. Disponível em: <<http://ossie.wireless.vt.edu/>>. Acesso em: 09 mar. 2014.

UNIVERSITY, A. **Asgard**. [S.l.:s.n], 2014. Disponível em: <http://wiki.asgard.lab.es.aau.dk/projects/asgard/wiki/Platform_Architecture>. Acesso em 9 mar. 2014.

WANG, P. et al. Demo: CogMAC+ - a decentralized multichannel MAC protocol for cognitive wireless networks. In: ACM WORKSHOP ON SOFTWARE RADIO IMPLEMENTATION FORUM, 2014, New York. **Proceedings...** New York: ACM, 2014.p. 23–26.

WENMIAO, S. Configure cognitive radio using gnu radio and usrp. In: MICROWAVE, ANTENNA, PROPAGATION AND EMC TECHNOLOGIES FOR WIRELESS COMMUNICATIONS, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON, 3., 2009, Beijing. **Proceedings...** Beijing: IEEE, 2009. p. 1123–1126.

WEST, N. et al. **Vector-optimized library of kernels**. Boston:[s.n], 2016. Disponível em: <<http://libvolk.org/>>. Acesso em : 09 mar. 2016.

WILD, B.; RAMCHANDRAN, K. Detecting primary receivers for cognitive radio applications. In: NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON, 2015, Baltimore. **Proceedings...** Baltimore: IEEE, 2005. p. 124–130.

ZHANG, T.; YU, X. Spectrum sharing in cognitive radio using game theory—a survey. In: WIRELESS COMMUNICATIONS NETWORKING AND MOBILE COMPUTING INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 6., 2010, Chengdu. **Proceedings...** Chengdu: IEEE, 2010. p. 1–5.

ZHAO, Q. et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework. **Selected Areas in Communications**, New York, v. 25, n. 3, p. 589–600, Apr. 2007.

ZHOU, G.; STANKOVIC, J. A.; SON, S. H. Crowded spectrum in wireless sensor networks. **IEEE EmNets**, Cambridge v. 6, p. 30–31, 2006.

ZIA, M.; QURESHI, F.; SHAH, S. Energy efficient cognitive radio MAC protocols for adhoc network: a survey. In: COMPUTER MODELLING AND SIMULATION, INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 15., 2013, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: IEEE, 2013. p. 140–143.

APÊNDICE

APENDICE A - Treinamento da RNA

Para o treinamento da RNA foram coletados dados durante 7 dias ininterruptos, nesses 7 dias, foram coletados dados do espectro local (frequência, hora de coleta e potência(RSSI)) abrangendo as faixas de $0,8GHz$ a $6GHz$ pois, para os experimentos realizados neste trabalho foram considerados somente essa faixa de frequência, além disso, esta faixa é ocupada por diversos serviços de usuários primários como TV, Telefonia Celular e o 3G. A USRP disponibilizada para este trabalho tem a abrangência de $70MHz$ a $6GHz$. Além de dados locais, o treinamento da RNA também utilizou os dados disponibilizados pela ANATEL, nesses dados, foram informados os donos da faixa de espectro, os UPs, e em qual faixa ele foi licenciado.

Foram utilizados $4/7$ dos dados coletados para o treinamento da RNA e os outros $3/7$ utilizados para validação do treinamento. Para encontrar os valores ótimos para os pesos das arestas da RNA, foram considerados alguns parâmetros como a taxa de aprendizagem e o *momentum*. O treinamento escolhido foi o supervisionado, pois a resposta desejada para o padrão de entrada já era conhecido. Foi definido que a melhor resposta seria a frequência que tem maior largura de banda e sem presença de um UP, ou com maior tempo livre de UP. O processo de aprendizagem escolhido foi o por época por ser mais estável já que os pesos das arestas são atualizados, em cada época, de acordo com a taxa de aprendizagem e o erro médio quadrático.

Para determinar o melhor valor para a taxa de aprendizagem (t_a) foram considerados os valores de 0,2 a 0,9. Com valores menores que 0,3, para t_a , as variações das épocas foram irrelevantes, com 1000 épocas não foram observadas alterações no erro médio quadrático. Portanto o treinamento foi interrompido. Para o valor de 0,9 em t_a , o treinamento atingia o limite de épocas (10000) sem que o erro médio quadrático fosse satisfatório. Variando exaustivamente t_a obteve-se 0,7 como melhor valor para t_a . Já para determinar o *momentum* foi escolhido o valor 0,0 pois não foi constatado problema de mínimo local.

Para determinar o número de camadas escondidas, foram testada uma RNA com as configurações entre 1 e 4 camadas escondidas. Foi constatado que a rede neural com 2 camadas escondidas e 1 camada de saída era a ideal para o problema proposto. Já para definir o número de neurônios foram executadas RNAs com variações no número de neurônios entre 10 e 100 variando de 5 em 5. Com isso, observou que a rede neural com 35 neurônios na camada escondida obtinha melhores resultados na validação pós-treinamento. Para maximizar esses resultados, foram executadas RNAs com variações no número de neurônios entre 32 e 38 variando de 1 em 1. Constatou-se que a RNA com melhores resultados na validação pós-treinamento foi a que continha 34 neurônios na camada escondida. Como o treinamento possuía 300 amostras, o risco de *overfitting* para mais de 100 neurônios na camada escondida era alto, portanto a escolha de 34 neurônios minimizava o risco de ocorrer *overfitting*.

A Tabela 14 apresenta as configurações utilizadas para a RNA desenvolvida neste trabalho.

Tabela 14 Configuração da RNA

Variáveis	Valores/Quantidades
Arquitetura	Perceptrons de Múltiplas camadas (MPL)
Função de Ativação	Sigmóide
Treinamento	Supervisionado
Processo de Aprendizagem	Época
Neurônios intermediários	34
Neurônios de saída	1
Camadas escondidas	2
<i>Momentum</i>	0,0
Taxa de aprendizagem	0,7
Erro Médio Quadrático	0,0004

Após esse treinamento a RNA era capaz de determinar qual era a melhor frequência para aquele determinado tempo. Como por exemplo considere duas frequências: $3,6GHz$ com RSSI de $-100dBm$ e a frequência de $5,8GHz$ com RSSI de $-90dBm$. De acordo com o treinamento a RNA descobriu que a frequência que fica mais tempo livre é a de $5,8GHz$, logo a RNA irá devolver como melhor frequência a $5,8GHz$ mesmo com o RSSI maior do que a de $3,6GHz$.

A seguir é apresentada a arquitetura dos nós mestre e escravo para o protocolo SIRCo.

APÊNDICE B - Algoritmos

Algoritmo do Nó Mestre

Algoritmo 7.1 SIRCo - Mestre

```

1: ciclos = 0;
2: ReconfiguraRadio(CCC);
3: enquanto ciclos < 10 faça
4:   DescobertaVizinhos();
5:   list[] = CriaListVizinhos();
6:   se (ciclo == 0) OU (ciclo == 5) então
7:     SolicitaSenseCompleto(list[]);
8:   senão
9:     SolicitaSenseRestrito(list[]);
10:  fim se
11:  t1_ccc = getTime();
12:  enquanto Não recebeu resultados nenhum vizinho faça
13:    Espera resultados do sensoriamento;
14:    t2_ccc = getTime();
15:    se (t2_ccc - t1_ccc) > 200 então
16:      ReconfiguraRadio(CCC);
17:      Vai para linha 3;
18:    fim se
19:  fim enquanto
20:  t1 = getTime();
21:  enquanto (time ≤ 20) OU (Todos os vizinhos enviaram seus resultados) faça
22:    se Recebeu novo resultado então
23:      t1 = getTime();
24:    senão
25:      t2 = getTime();
26:      time = t2 - t1;
27:    fim se
28:  fim enquanto
29:  result_total = PreProcessaResults();
30:  melhor_freq = RNA(result_total);
31:  ComunicaVizinhos(melhor_freq);
32:  se (Se todos os nós vizinhos alteraram as suas frequências) OU (Tempo esgotado) então
33:    ReconfiguraRadio(melhor_freq);
34:  fim se
35:  t1 = getTime();
36:  enquanto time_trans ≤ 60 faça
37:    TransmiteDados();
38:    t2 = getTime();
39:    time_trans = t2 - t1;
40:  fim enquanto
41:  ciclo++;
42: fim enquanto

```

No Algoritmo 7.1 é descrito a implementação em pseudocódigo do nó mestre. Nas linhas 1 à 5 tem-se a fase inicial do protocolo, onde é realizado

a descoberta de vizinhos. Na linha 2 o nó mestre configura o seu rádio para operar no canal de controle comum (CCC) definido em $6GHz$. Na linha 6 o nó mestre decide se solicita o sensoriamento completo do espectro (faixas de $0,8GHz$ à $6GHz$) ou o sensoriamento restrito. O sensoriamento do espectro é a fase mais demorada do protocolo e se todas as requisições de sensoriamento do nó mestre fossem das faixas de $0,8GHz$ à $6GHz$ o protocolo não teria um desempenho satisfatório. Então optou-se por fazer esse sensoriamento completo a cada 5 ciclos de execução.

Após o nó mestre enviar as solicitações de sensoriamento do espectro (linhas 7 ou 9) ele entra em modo *idle* (linha 13), pois o tempo de execução do sensoriamento, por parte dos nós escravos, varia de acordo com as frequências que o nó mestre quer sensoriar. Se o nó mestre não receber nenhuma informação de sensoriamento do espectro até um determinado limiar (200 segundos) ele considerará que perdeu a conexão dos os demais nós da rede e irá reiniciar o processo de descoberta de vizinhos (linhas 14 à 19). Se o nó mestre receber informações sobre o sensoriamento do espectro, o mesmo irá esperar 20 segundos desde a última informação recebida para então processar essas informações (linha 21).

O laço `enquanto` da linha 21 foi desenvolvido para garantir que a resiliência da RRC. Se considerar que a RRC possua quatro nós escravos e que um desses nós escravos não enviasse as suas informações, o nó mestre, iria esperar indefinidamente que esse nó escravo enviasse as suas informações. Entretanto, o laço da linha 21 garante que se um nó se desconectar durante o envio das informações de sensoriamento a RRC não irá parar, garantindo assim as suas funcionalidades.

Após o nó mestre receber as informações sobre o sensoriamento do espectro, o mesmo irá processar essas informações afim de que sejam consideradas entradas válidas para o modelo de decisão implementado (linha 29). Na linha 30 é executado o módulo cognitivo do protocolo, a RNA, este modulo é capaz de classificar todas as frequências presentes na variável `result_total`. Com isso, o módulo retorna a melhor frequência na variável `melhor_freq`.

Com a descoberta da melhor frequência o protocolo SIRCo comunica todos os seus vizinhos para que alterem a frequência para a melhor frequência (linha 31), fase CE. Após todos os nós alterarem a sua frequência, o nó mestre, altera a frequência do seu rádio chamando a função `ReconfiguraRadio(melhor_freq)` (linha 33).

A transmissão dos dados ocorre entre as linhas 35 e 40. As linhas 33 e 37 representam a fase ME da Figura 15. Na linha 41 a variável `ciclo` é incrementada. O algoritmo executa até completar os dez ciclos previamente definidos.

Algoritmo do Nó Escravo

No Algoritmo 7.2 observa-se a implementação em pseudocódigo do nó escravo. Assim que o código do nó escravo é iniciado, o mesmo, começa em modo *idle* (linha 3). Na linha 4 o nó escravo recebe uma mensagem do nó mestre, essa mensagem deve ser decodificada para que o nó escravo possa realizar suas ações (linha 6).

Entre as linhas 7 e 34, o nó escravo, realiza uma ação distinta para cada tipo de mensagem recebida. Se a mensagem for uma requisição de descoberta de vizinhos, o nó escravo, responde a mensagem com o seu ID (linha

Algoritmo 7.2 SIRCo - Escravo

```

1: ciclos = 0;
2: enquanto ciclos < 10 faça
3:   Espera alguma mensagem do nó mestre;
4:   {Mensagem destinada ao nó escravo foi recebida}
5:   Inicio
6:     msg = DecodificaMSG();
7:     se msg.tipo == '0' então
8:       Responde com o seu próprio ID;
9:     fim se
10:    se msg.tipo == '2' então
11:      result = SensoriamentoEspectro();
12:      EnviaMsgOrigem(result);
13:    fim se
14:    se msg.tipo == '3' então
15:      EnviaMsgOrigem(ack);
16:      ReconfiguraRadio(msg.dado);
17:      t1 = getTime();
18:      enquanto time_trans ≤ 60 faça
19:        rssi = EscutaEspectro();
20:        se rssi < -85 então
21:          TransmiteDados();
22:          t2 = getTime();
23:          time_trans = t2 - t1;
24:        fim se
25:      fim enquanto
26:    fim se
27:    se msg.tipo == '4' então
28:      msg.tipo = '5'
29:      EnviaMsgOrigem(msg);
30:    fim se
31:    se msg.tipo == '5' então
32:      CalculaRTT();
33:    fim se
34:  Fim
35:  ciclo++;
36: fim enquanto

```

8). Se a mensagem for uma requisição para o sensoriamento do espectro (linha 10), o nó escravo realiza o sensoriamento de acordo com o intervalo de frequências presente na mensagem recebida e pré-processa os dados para que fiquem no formato do código 2. Com a mensagem formatada, o nó escravo, à envia para o nó mestre por meio da função `EnviaMsgOrigem(result)` (linha 12).

Se a mensagem recebida pelo nó escravo for do tipo 3 (ver Tabela 3), o nó envia um ack para o nó mestre informando que recebeu a mensagem

(linha 15). Na linha 16, o nó escravo, reconfigura o seu rádio para que opere na nova frequência por meio da função `ReconfiguraRadio(msg.dado)`. Entre as linhas 17 e 25 ocorre a transmissão dos dados do usuário secundário da RRC. Antes de transmitir os dados é feita uma leitura breve de RSSI da frequência em que o nó está operando para garantir que não há nenhum usuário primário presente na frequência atual, caso essa leitura resultar em um RSSI menor que -85 dBm a transmissão dos dados do US é iniciada (linhas 19 e 20).

Se a mensagem for do tipo 4 (ver Tabela 3) então é uma mensagem de transmissão de dados por parte de algum nó escravo da rede. O nó que recebeu essa mensagem simplesmente troca o tipo da mensagem para o tipo 5 para que o nó origem seja capaz de calcular o RTT da mensagem. Essa calculo é realizado na linha 32.

APÊNDICE C - Resultados com SLP

Taxa de Entrega

No gráfico da Figura 39-(a) é apresentada a taxa média de entrega dos pacotes para o cenário 1, onde foi considerado os três modelos de tráfegos (L, M e H) e o par de nó (S1/M). Nota-se que os resultados foram próximos para todos os MDE analisados, mesmo considerando o intervalo de confiança. Isso pode ser justificado já que a rede foi composta por dois nós e os níveis de interferência das trocas de mensagens não geravam colisões suficientes para ocorrer discrepâncias acentuadas nos resultados.

Na Figura 39-(b) é apresentada a taxa média de entrega dos pacotes para o cenário 2, no qual a troca de mensagens ocorreu entre os pares de nós: mestre (M) e escravo 2 (S2); escravo 3 (S3) e escravo 1 (S1). Observa-se que o MDE-RNA foi superior em até 170% e 74% que os MDE-AHP e MDE-Cog para o padrão de tráfego alto (H), respectivamente. No padrão de tráfego médio (M), o MDE-RNA foi superior em até 92% e 34% que os MDE-AHP e MDE-Cog, respectivamente. No padrão de tráfego baixo (L) o MDE-RNA foi superior em até 38% e 18% que o MDE-AHP e MDE-Cog, respectivamente. A taxa de entrega do MDE-RNA seguiu um padrão constante entre os modelos de tráfego, à medida em que o tráfego de mensagens diminui, aumenta a taxa de entrega. Os outros MDE, especialmente o MDE-AHP, obtiveram os piores resultados. Esse resultado se deve ao fato do MDE-RNA possuir um módulo de RNA, cujo o treinamento classifica as melhores frequências, já nos outros MDE não existe esse treinamento.

No gráfico da Figura 39-(c) é apresentada a taxa média de entrega dos pacotes para o cenário 3, considerando que as trocas de mensagens

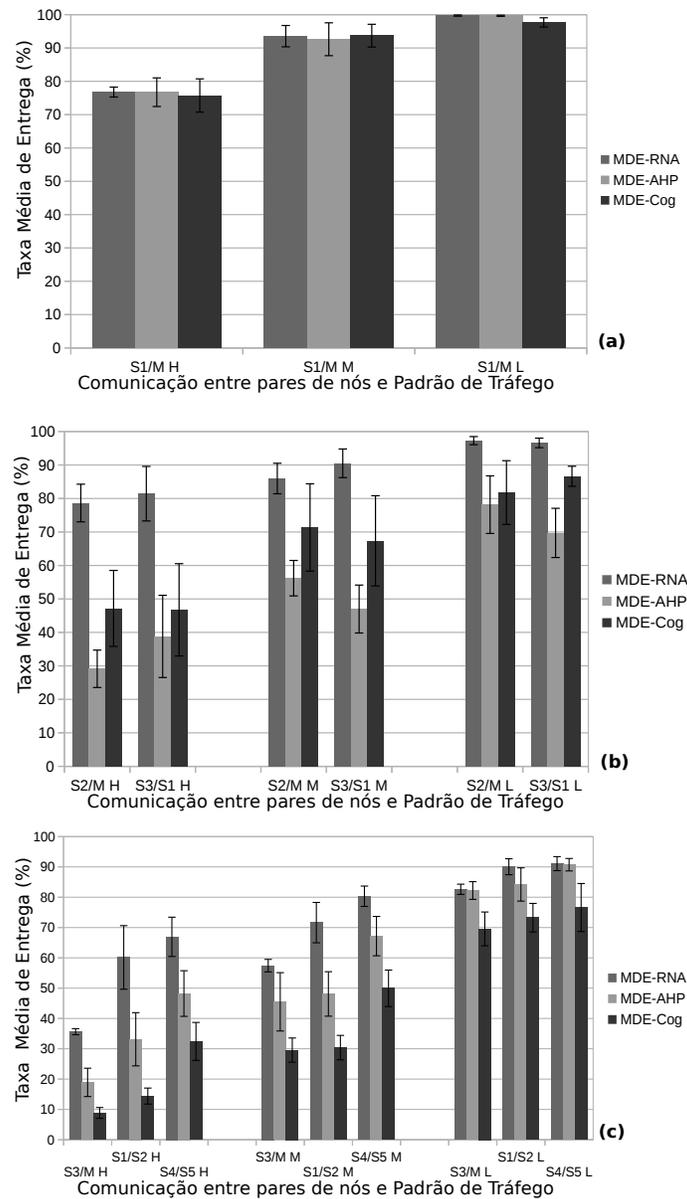


Figura 39 Taxa de Entrega para os Cenário 1 (a), Cenário 2 (b) e Cenário 3 (c) considerando a estratégia SLP

ocorreu entre os pares de nós: (S3/M), (S1/S2) e (S4/S5). Observa-se que o MDE-RNA foi superior em até 88,3% e 317% que os MDE-AHP

e MDE-Cog para o padrão de tráfego alto (h), respectivamente. Para o padrão de tráfego médio (M), o MDE-RNA foi superior em até 49% e 135% que os MDE-AHP e MDE-Cog, respectivamente. No padrão de tráfego baixo (L), o MDE-RNA foi superior em até 6,4% e 22,6% que o MDE-AHP e MDE-Cog, respectivamente. Observa-se que o MDE-RNA obteve melhores resultados no padrão de tráfego alto, em relação aos outros MDE. Com isso, conclui-se que o MDE-RNA tem um desempenho melhor em ambientes com intensa troca de mensagens, conseqüentemente, um ambiente com interferência elevada.

Latência

Na Figura 40 são apresentadas as latências médias medida em RTT para os cenários 1, 2 e 3 utilizando a estratégia SLP. É importante observar que a latência apresentada representa o RTT entre os nós. Assim latência efetiva é metade do valor apresentado, assumindo que os enlaces são simétricos. O gráfico da Figura 40-(a) mostra que o MDE-RNA obteve a menor latência no padrão de tráfego médio. Isso pode ser justificado porque, o módulo de decisão escolhe as melhores frequências, próximas a frequência limite de $6GHz$.

Na Figura 40-(b) é apresentada a latência média (RTT) para o cenário 2. Observa-se que o MDE-RNA é mais eficiente nos padrões de tráfegos M e L, nos demais padrões não ocorreram variações significativas entre os MDEs devido a proximidade dos nós. No geral, o MDE-RNA leva ligeira vantagem sobre os demais MDEs analisados.

No gráfico de Figura 40-(c) é mostrada a latência média (RTT) para o cenário 3. Nota-se que não ocorreram discrepâncias entre os MDE. Con-

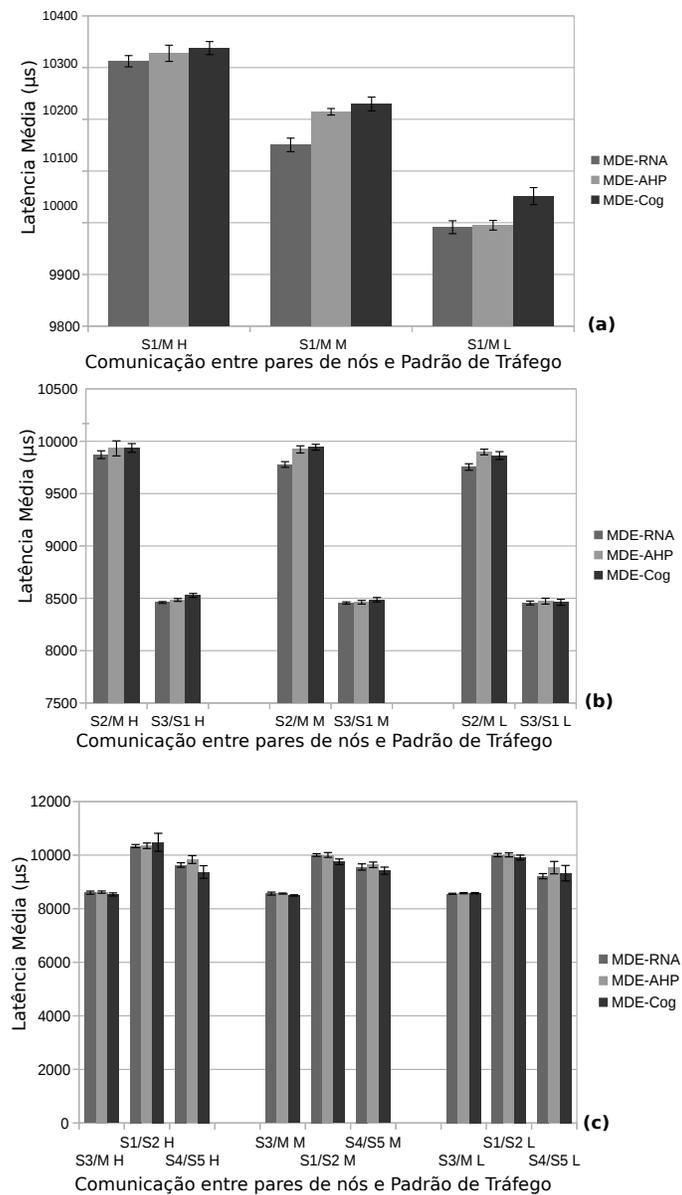


Figura 40 Latência em RTT para os Cenário 1 (a), Cenário 2 (b) e Cenário 3 (c) considerando a estratégia SLP

siderando os três cenários, o MDE-RNA foi igual ou melhor que os outros MDE.

Handoff

Na Figura 41 são mostrados o *handoff* para os três MDEs do cenário 1. O MDE-RNA foi o modelo que permaneceu por mais ciclos nas frequências de maior banda larga ($> 5GHz$), Figura 41-(a). Para todos os modelos de tráfego o MDE-RNA foi capaz de permanecer em frequências superiores a $5,6GHz$ e inferiores a $5,8GHz$, sendo que a frequência mais acionada foi de $5,76GHz$. A classe predominante conforme a Tabela 13 foi a *C7*, sendo que o método de decisão escolheu essa classe 100% dos ciclos.

No MDE-AHP, o modelo de decisão variou entre três classes a sua frequência de operação (Figura 41-(b)), sendo que, a frequência mínima de operação foi de $0,8GHz$ e a máxima foi de $5,8GHz$ e a frequência que mais foi utilizada foi de $0,8GHz$. Portanto, o MDE-AHP utilizou 47,77% do seus ciclos para a classe *C1*, 42,22% para a classe *C5* e 10% para a classe *C7*. O MDE-AHP tende a priorizar mais as classes de frequências baixas, pois o seu modelo de previsão não é tão preciso quanto o do MDE-RNA.

Já para o MDE-Cog (Figura 41-(c)), a frequência mínima escolhida foi $3,62GHz$ e a frequência máxima foi de $5,22GHz$, como frequência mais utilizada a $3,98GHz$. A frequência mais utilizada pertence a classe *C5*, sendo que, o modelo permaneceu nessa classe 85,5% dos ciclos executados.

Apesar dos três modelos escolherem frequências diferentes, a taxa de entrega de pacotes e a latência não foram discrepantes pois, o cenário avaliado não foi capaz de gerar grandes fluxos de trocas de mensagens, conseqüentemente não houveram grandes perdas e nem uma quantidade expressiva de colisões. O objetivo deste cenário foi verificar a conectividade da RRC.

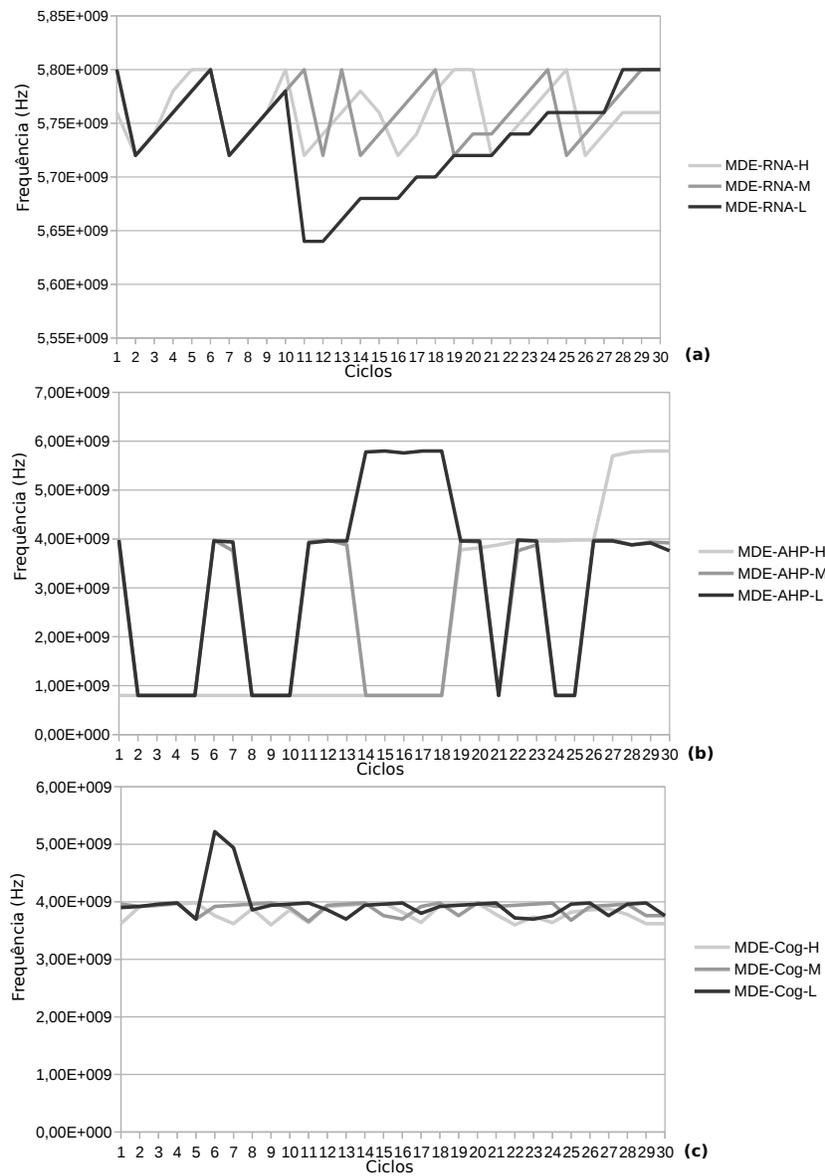


Figura 41 *Handoff* dos modelos de decisão para o Cenário (1): (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.

Na Figura 42 são apresentados os gráficos de *handoff* para o cenário (2) SLP. Observa-se no gráfico da Figura 42-(a) que o modelo de de-

cisão MDE-RNA permaneceu 100% dos ciclos nas frequências do intervalo $[5,6GHz, 5,8GHz]$ caracterizando a classe de frequências $C7$, sendo que a frequência mais utilizada foi a de $5,8GHz$. Esse fato, justifica a alta entrega de pacotes do MDE-RNA em relação aos demais modelos. O MDE-RNA gastou 100% de seus ciclos da classe $C7$ garantindo assim uma maior largura de banda para a RRC e conseqüentemente uma maior taxa de entrega de pacotes. Considerando a latência, o MDE-RNA obteve vantagem em relação aos demais modelos, pois em frequência altas o comprimento da onda é menor, com isso o tempo de envio do mesmo também é menor.

Em relação ao modelo de decisão do modelo MDE-AHP (Figura 42-(b)), a permanência foi de 97,7% dos ciclos nas frequências da classe $C1$ com predominância na frequência $0,8GHz$ (76% dos ciclos gasto em $C1$). Os outros 2,22% dos ciclos foram gastos em frequências da classe $C7$, justificando assim um pior desempenho em relação ao MDE-RNA e ao MDE-Cog.

No gráfico da Figura 42-(c) é mostrado o *handoff* do modelo de decisão MDE-Cog. Observa-se que 73,3% dos ciclos foram utilizados na classe $C1$, enquanto que 6,6% foram gastos na classe $C6$ e 20% na classe $C7$. Com isso, o MDE-Cog tem um desempenho melhor que o MDE-AHP pois, permaneceu mais ciclos nas classes mais elevadas.

Na Figura 43 são apresentados os gráficos de *handoff* obtidos no cenário (3) sem a leitura prévia do espectro. Observa-se que o MDE-RNA (Gráfico 43-(a)) manteve a tendência e permaneceu 100% dos ciclos na classe $C7$, enquanto que os modelos MDE-AHP e MDE-Cog (Gráficos 43-(b) e 43-(c), respectivamente) variaram entre as classes $C1, C6$ e $C7$. O MDE-AHP permaneceu 24 ciclos de execução na classe $C7$, ou 26,6% dos ciclos enquanto que, o MDE-Cog permaneceu somente 2,22% dos ciclos na classe

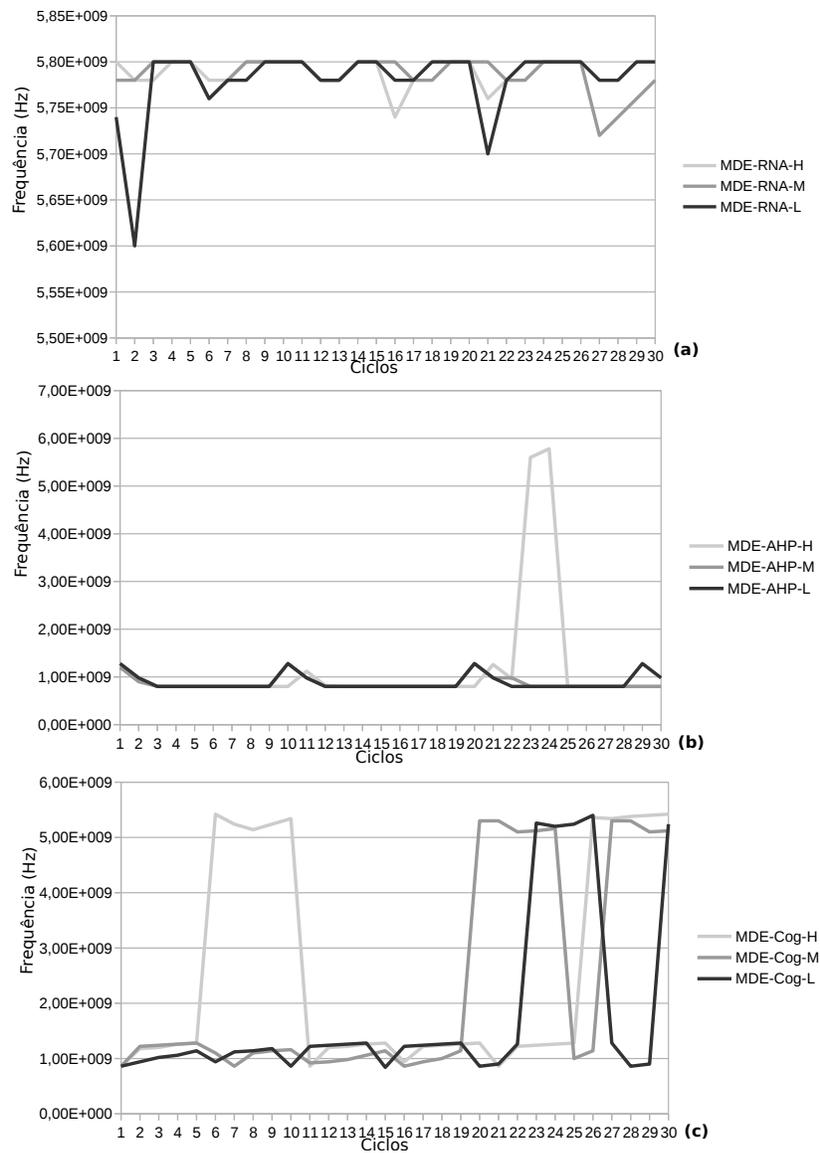


Figura 42 *Handoff* dos modelos de decisão para o Cenário (2) utilizando SLP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.

C7. Com isso, pode-se afirmar que o MDE-AHP obteve um melhor desem-

penho em relação ao MDE-Cog por manter-se mais ciclos em classes altas de frequências.

O desempenho insuficiente do modelo de decisão do MDE-Cog se deve ao fato de que o mesmo permaneceu mais de 94% dos ciclos na classe C1 e esta classe é composta por frequências de baixa banda com presença elevada de UPs (vide Tabela 7).

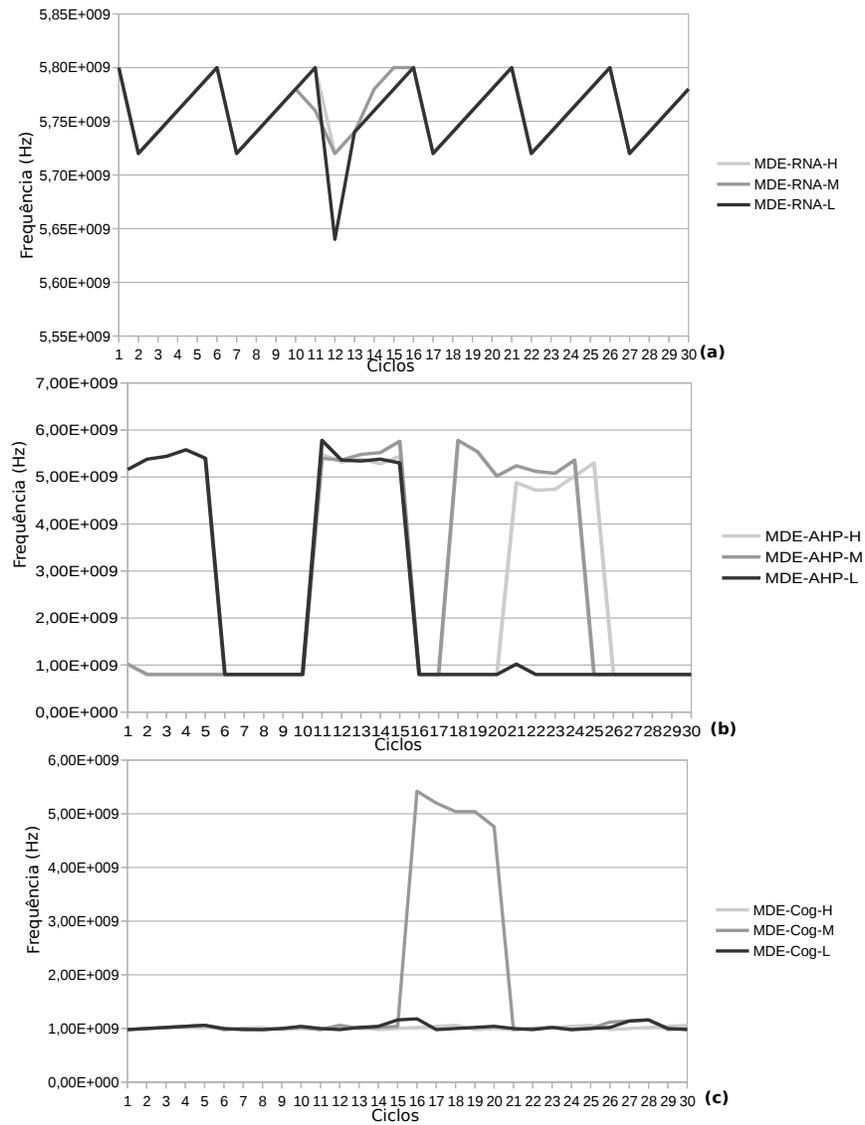


Figura 43 *Handoff* dos modelos de decisão para o Cenário (3) utilizando SLP: (a) MDE-RNA, (b) MDE-AHP e (c) MDE-Cog.

APÊNDICE D - Contribuições

Até a presente data de publicação desse trabalho foram publicados os seguintes artigos com a participação do autor desta dissertação:

Participação direta:

- O artigo Marques et al. (2016b) foi publicado na conferência “*20th IEEE Symposium on Computers and Communications - ISCC*” promovida pelo “*Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*” que tem como *Qualis* Capes o estrato **A2**.
- O artigo Marques et al. (2016a) foi publicado no “*XXI Workshop de Gerência e Operações de Redes e Serviços - WGRS*” edição realizada durante o “*XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*” que foi promovido pela Sociedade Brasileira de Computação (SBC) que tem como *Qualis* Capes o estrato **B5**.

Participação indireta:

- O artigo Júnior, Marques e Correia (2016) foi publicado no “*XXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC*” que foi promovido pela Sociedade Brasileira de Computação (SBC) que tem como *Qualis* Capes o estrato **B2**.